

21.254/1A/1/05



MILIK PERPUSTAKAAN  
INSTITUT TEKNOLOGI  
SEPULUH - NOPEMBER

## TUGAS AKHIR (KP 1701)

# PENGGUNAAN DISTRIBUSI WEIBULL UNTUK MENENTUKAN PROBABILITAS FRACTURE MECHANICS SAMBUNGAN LAS DENGAN DEFECT



RSpe  
529.5  
sul  
P-1  
-  
2003

Disusun Oleh

**SULASMAN**

NRP. 4198 100 024

PERPUSTAKAAN  
ITS

Tgl. Terima 19-8-2003

Terima Dari H/

No. Agenda Prp. 208934

**JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2003**



DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN  
**JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN**

Kampus ITS -Sukolilo, Surabaya 60111 Telp. 5947254, 5994251-5 Fes. 1173 - 1176 5947254

**SURAT KEPUTUSAN TUGAS AKHIR**

No. : 119 a/ K03.4.2/PP/2003

Nama Mahasiswa : S u l a s m a n  
Nomor Pokok : 4198100032  
Tanggal diberi tugas : 10 Pebruari 2003  
Tanggal selesai tugas : 27 Juni 2003  
Dosen Pembimbing : 1. Ir. Soeweify, M.Eng.  
2.

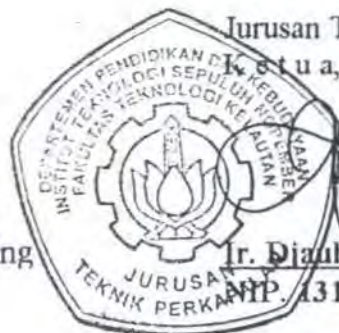
Uraian / judul tugas akhir yang diberikan :

**#PENGGUNAAN DISTRIBUSI WEIBULL UNTUK MENENTUKAN PROBABILITAS  
FRACTURE MECHANIC SAMBUNGAN LAS DENGAN DEFECT#**

Surabaya, 12 Maret 2003

Jurusan Teknik Perkapalan

K e t u a,



Ir. Djauhar Manfaat, MSc., Ph.D.

NIP. 131 651 444.

Tembusan :

1. Yth. Dekan FTK-ITS
2. Yth. Dosen Pembimbing
3. Arsip

**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**  
**FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN**  
**JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN**  
**S I**

**PENGUNAAN DISTRIBUSI WEIBULL UNTUK MENENTUKAN**  
**PROBABILITAS FRACTURE MECHANICS**  
**SAMBUNGAN LAS DENGAN DEFECT**

**ABSTRAK**

Model struktur sambungan Butt-Joint Baja SS 41 sesuai standar ASTM diuji fatigue untuk mendapatkan sejumlah data tentang geometri retak dalam bentuk elips. Analisis reliabilitas Weibull digunakan untuk mendeskripsikan proses evolusi kapabilitas operasional struktur apabila mendapatkan siklus beban yang berulang-ulang. Fungsi keandalan Weibull akan memperkirakan siklus beban maksimum konstruksi dengan ukuran retak tertentu masih tetap layak dioperasikan. Data uji fatigue ini kemudian disimulasi secara numerik dengan bantuan komputer untuk mengetahui umur kelelahan struktur.

Dari hasil program diketahui bahwa sejumlah spesimen sambungan Butt-Joint SS 41 memiliki rata-rata cycle kegagalan terbesar secara beturut-turut adalah spesimen 3.1; 3.4; 3.3; 1.2; 2.2; dan 2.1; sebesar  $5,0E+4$ ;  $4,2E+4$ ;  $2,8E+4$ ;  $2,0E+4$ ;  $1,8E+4$ ;  $1,7E+4$  cycle. Keandalannya masing –masing adalah 47,0%; 47,9%; 48,8%; 48,0%; 47,1%; dan 43,2%.



**SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  
**OCEAN ENGINEERING FACULTY**  
**NAVAL ARCHITECTURE and SHIPBUILDING DEPARTMENT**  
**DEGREE (S I)**

**WEIBULL METHODE TO DETERMINISTIC PROBABILITY**  
**FRACTURE MECHANICS BUTT JIONT WITH DEFECT**

**ABSTRACT**

The model of Butt-Joint connection structure of Mild Steel SS 41 according ASTM standar was be tested for fatigue to obtain data regarding the crack geometri like elips. Weibull Reliability analisys was use to decription evolution process the capable operation of structure when cycle load applied to it. Weibull Reliability Function will estimate maximum cycle load constrution when has certain crack geometri, so that it's still safe to operate. Then, The data of fatigue has been calculated for numerical simulation process by computer to determine fatigue life structure.

As result of simulation was knowed that the mean time between failure spesimens Butt-Joint of Mild Steel SS 41 from maximum to minimum , for spesimen 3.1; ; 3.4; 3.3; 1.2; 2.2; and 2.1; are 5,0E+4; 4,2E+4; 2,8E+4; 2,0E+4; 1,8E+4; 1,7E+4 cycle. And reliability of them are 47,0%; 47,9%; 48,8%; 48,0%; 47,1%; and 43,2%.



Kiat'a  
pengantar



Sulasman © 2003

## **KATA PENGANTAR**

Alhamdulillah dan puji syukur yang tidak terkira penulis panjatkan ke hadirat Yang Maha Agung Alloh S.W.T atas restu dan ridho-Nya hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini dengan judul:

### **PENGUNAAN DISTRIBUSI WEIBULL UNTUK MENENTUKAN PROBABILITAS FRACTURE MECHANICS SAMBUNGAN LAS DENGAN DEFECT**

Tugas Akhir ini merupakan salah satu prasyarat kelulusan untuk mencapai gelar sarjana pada Jurusan Teknik Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis telah mengerahkan segala daya dan upaya demi tersusunnya Tugas Akhir ini dengan sebaik-baiknya. Akan tetapi demi Keagungan dan Kesempurnaan yang hanya dimiliki oleh Alloh S.W.T, tentunya masih banyak kekurangan dan kelemahan yang ada dalam penulisan Tugas Akhir ini.

Untuk itu penulis mengharapkan banyak saran dan kritik yang membangun demi peningkatan kualitas Tugas Akhir ini. Dan terakhir, semoga apa yang telah penulis berikan dalam Tugas Akhir ini dapat menjadi sumbangan bagi Jurusan Teknik Perkapalan khususnya dan Ilmu Pengetahuan pada umumnya.

*Amin.*

*Surabaya, ..... 2003*

*Penulis*





Ucapan  
terima  
kasih





## UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah, hanya dengan bantuan segenap pihak maka Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Atas segala apa yang telah penulis dapatkan, maka inilah saat hati membungkuk, mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bpk. Ir. Soeweify, M.Eng, Dosen Pembimbing Tugas Akhir, maaf Pak kalau selama ini selalu merepotkan Bapak. I addmitted that you had given the best guidance and conselling for me;
2. Bpk. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Perkapalan;
3. Bpk. Ir. I.K.A.P. Utama, M.Sc., Ph.D., selaku Sekretaris Jurusan Teknik Perkapalan;
4. Bpk. Ir. Tri Achmadi, P.hD, selaku Dosen Wali yang selalu membimbing dan memberikan arahan selama kuliah di Jurusan Teknik Perkapalan;
5. Bpk. Ediwidarto dan Bpk. Kasyono, Divisi Kapal Niaga PT. PAL Indonesia, atas segala bantuannya;
6. Salam takjim dan hormat Ananda haturkan untuk Ayahanda dan Bunda tercinta, atas segala doa selama menyelesaikan studi di Teknik Perkapalan;
7. Dik Tifal dan Rusman, Kak Adi, Atun dan Puspa di Batam, kalian selalu memberi inspirasi dan harapan besar bagiku untuk menyelesaikan studi, god bless you all;
8. Bapak dan Ibu Siddiq, serta nenek di Bau-Bau, Ananda persembahkan beribu maaf bila selama ini selalu merepotkan Bapak dan Ibu;

9. Tante Nur di Bau-Bau, semoga Alloh S.W.T memberikan rahmat dan karunia-Nya, Amin;
10. WD. Asriatyn, yang telah memberi warna dalam hidup-ku, sehingga arti tidak lagi sekedar kata-kata;
11. Bapak dan Ibu Pipit di Rungkut, awal dan akhir studi Ananda semuanya dimulai dalam keluarga Bapak, sembah sujud Ananda 'tuk menghaturkan beribu terimakasih;
12. Pa' Yanto, Pa' Pardi, Andi yang telah membantu pembuatan spesimen, serta Pa' Djito atas kesabarannya sebagai teknisi selama percobaan fatigue.
13. Mas yy, trim's untuk bantuannya dalam penyempurnaan program, Prio dan Yupi (teman seperjuangan TA),
14. Semua teman kontrakan, Teng-Q, Agung, Andik, Wahyu, Endro, Bean, Ryan, Anjar, yang selalu menyediakan fasilitas dalam penyelesaian Tugas Akhir ini, semoga kalian nggak bosan berteman dengan aku, thanks a lot friends;
15. Semua teman Bonga '98, atas segala bantuan dan gojlokannya, semoga kalian segera menemukan jalan yang terang, Amin;
16. Dan kepada semua pihak yang tidak mungkin disebutkan satu-persatu, yang telah memberikan bantuannya selama penulis kuliah di ITS.





Daftar  
gambar





## DAFTAR GAMBAR

Gambar I.1. Spesimen uji fatigue sesuai standar ASTM.....	I-6
Gambar II.1. Grafik pembebanan statis.....	II-2
Gambar II.2. Definisi istilah dalam pembebanan dinamis.....	II-3
Gambar II. 3. Pembebanan sinusoidal.....	II-5
Gambar II.4. Pembebanan segitiga.....	II-5
Gambar II.5. Pembebanan segiempat.....	II-6
Gambar II.6. Pembebanan gergaji positif.....	II-6
Gambar II.7. Pembebanan gergaji negatif.....	II-7
Gambar II.8. Pembebanan di atas sumbu nol.....	II-8
Gambar II.9. Pembebanan melewati sumbu nol.....	II-8
Gambar II.10. Pembebanan dibawah sumbu nol.....	II-9
Gambar II.11. Tiga mode deformasi retak (Broek, 1984).....	II-10
Gambar II.12. Medan tegangan di ujung retak (Almar-Naess, 1985).....	II-11
Gambar II.13. Faktor koreksi $X_o^{(1)}$ .....	II-15
Gambar II.14. Faktor koreksi $X_o^{(2)}$ .....	II-16
Gambar II.15. Faktor koreksi $X_o^{(3)}$ .....	II-16
Gambar II.16. Kurva perambatan retak dan penurunan kekuatan akibat retak (Broek, 1982).....	II-19
Gambar III.1. Fungsi density Peluang (PDF), kekuatan (R), dan ambang keamanan.....	III-8

Gambar Lamp.A.6., Kurva  $\Delta K$  Terhadap Pertambahan N spesimen 3.4

Lamp.A-14

Gambar Lamp.B.1. Tampilan Form Perkiraan Parameter Weibull... Lamp.B-14

Gambar Lamp.B.2. Kurva PDF Spesimen 1.2..... Lamp.B-14

Gambar Lamp.B.3. Kurva PDF Spesimen 2.1..... Lamp.B-15

Gambar Lamp.B.4. Kurva PDF Spesimen 2.2..... Lamp.B-15

Gambar Lamp.B.5. Kurva PDF Spesimen 3.1..... Lamp.B-15

Gambar Lamp.B.6. Kurva PDF Spesimen 3.3..... Lamp.B-16

Gambar Lamp.B.7. Kurva PDF Spesimen 3.4..... Lamp.B-16

Gambar Lamp.B.8. Kurva Laju Kegagalan Spesimen 1.2..... Lamp.B-16

Gambar Lamp.B.9. Kurva Laju Kegagalan Spesimen 2.1..... Lamp.B-17

Gambar Lamp.B.10. Kurva Laju Kegagalan Spesimen 2.2..... Lamp.B-17

Gambar Lamp.B.11. Kurva Laju Kegagalan Spesimen 3.1..... Lamp.B-17

Gambar Lamp.B.12. Kurva Laju Kegagalan Spesimen 3.3..... Lamp.B-18

Gambar Lamp.B.13. Kurva Laju Kegagalan Spesimen 3.4..... Lamp.B-18

Gambar Lamp.B.14. Kurva Keandalan Spesimen 1.2..... Lamp.B-18

Gambar Lamp.B.15. Kurva Keandalan Spesimen 2.1..... Lamp.B-19

Gambar Lamp.B.16. Kurva Keandalan Spesimen 2.2..... Lamp.B-19

Gambar Lamp.B.17. Kurva Keandalan Spesimen 3.1..... Lamp.B-19

Gambar Lamp.B.18. Kurva Keandalan Spesimen 3.3..... Lamp.B-20

Gambar Lamp.B.19. Kurva Keandalan Spesimen 3.4..... Lamp.B-20



Daftar  
tabel





## DAFTAR TABEL

Tabel IV.1. Hasil perhitungan Fatigue Life (N) Baja SS-41.....	IV-4
Tabel IV.2. Pasangan Parameter Tiap Spesimen.....	IV-4
Tabel IV.3. Reliability dan Laju Kegagalan Spesimen 1.2.....	IV-7
Tabel IV.4. Reliability dan Laju Kegagalan Spesimen 2.1.....	IV-8
Tabel IV.5. Reliability dan Laju Kegagalan Spesimen 2.2.....	IV-10
Tabel IV.6. Reliability dan Laju Kegagalan Spesimen 3.1.....	IV-11
Tabel IV.7. Reliability dan Laju Kegagalan Spesimen 3.3.....	IV-13
Tabel IV.8. Reliability dan Laju Kegagalan Spesimen 3.4.....	IV-14
Tabel Lamp. C.1. Nilai fungsi gamma $\Gamma(k)$ untuk nilai $1 \leq k \leq 2$ .....	Lamp. C-1



D'a'ft'ar

Isi



## DAFTAR ISI

### ABSTRAK

KATA PENGANTAR.....i

UCAPAN TERIMA KASIH.....ii

DAFTAR GAMBAR.....iv

DAFTAR TABEL.....vii

**BAB I PENDAHULUAN.....I-1**

1.1 LATAR BELAKANG.....I-1

1.2 TUJUAN.....I-4

1.3 MANFAAT.....I-4

1.4 BATASAN MASALAH.....I-5

1.5 METODOLOGI PENELITIAN.....I-5

1.6 GEOMETRI SAMBUNGAN LAS BUTT-JOINT.....I-6

**BAB II DASAR TEORI.....II-1**

2.1 KONSEP PEMBEBANAN STATIS DAN DINAMIS.....II-1

2.1.1 Pembebanan Statis.....II-2

2.1.2 Pembebanan Dinamis.....II-2

2.2 KONSEP MEKANIKA KEPECAHAN (FRACTURE MECHANIC) .....II-9

2.2.1 Tegangan di Ujung Retak.....II-9

2.2.2 Model Pertumbuhan Retak.....II-12

2.2.3 Faktor Intensitas Tegangan.....II-13



2.3	PENGERTIAN DASAR FATIGUE.....	II-17
2.4	MEKANISME KEGAGALAN KELELAHAN SAMBUNGAN LAS.....	II-18
2.4.1	Keretakan.....	II-18
2.4.2	Pertumbuhan Retak Akibat Kelelahan pada Sambungan Butt-Joint.....	II-19
<b>BAB III</b>	<b>ANALISA PROBABILITAS KEGAGALAN SAMBUNGAN LAS DENGAN DEFECT.....</b>	<b>III-1</b>
3.1	KONSEP KETIDAKPASTIAN.....	III-1
3.2	KONSEP ANALISA PELUANG KEANDALAN.....	III-4
3.2.1	Analisa Keandalan Dengan Metoda Weibull.....	III-9
3.3	PROSEDUR PERHITUNGAN ANALISA KEANDALAN..	III-18
<b>BAB IV</b>	<b>ANALISA DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>IV-1</b>
4.1	HASIL PERHITUNGAN FATIGUE LIFE.....	IV-1
4.2	PENAKSIRAN PARAMETER .....	IV-4
4.3	FUNGSI KEANDALAN WEIBULL .....	IV-5
4.4	GRAFIK HIBUNGAN RANGE INTENSITAS TEGANGAN TERHADAP FATIGUE LIFE.....	IV-15
<b>BAB V</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>V-1</b>
5.1	KESIMPULAN.....	V-1
5.2	SARAN.....	V-2

## DAFTAR PUSTAKA

## LAMPIRAN



# Bab I

## Pendahuluan





## BAB I

### PENDAHULUAN

#### 1.1 LATAR BELAKANG

Pesatnya kemajuan dalam teknologi pengelasan, menyebabkan hampir setiap konstruksi baja akan selalu melibatkan pengelasan misalnya kapal, konstruksi lepas pantai dan jembatan. Untuk itu dilakukan inspeksi yang ketat baik welding procedure maupun welder qualification test dalam upaya menjamin kekuatan sambungan las tersebut.

Meskipun demikian cacat las sering terjadi, baik cacat dalam material las yang hanya dapat dilihat dengan x Ray atau Ultrasonic maupun cacat diluar material las. Akibatnya, fatigue life konstruksi yang dilas berkurang.

Perilaku fatigue suatu komponen struktur disebabkan oleh variasi beban dinamik salah satu yang banyak dikenal dalam masalah rekayasa adalah sensitifitas ekstrim pada sifat material, komponen geometri, variasi beban dan kondisi lingkungan.

Teknologi canggih juga berdampak pada bertambahnya permintaan dalam hal jaminan pengoperasian bebas kegagalan (*failure-free operation*) beragam komponen dan sistem dalam batas kinerja tertentu, dan untuk masa tertentu. Hal ini merupakan konsep dari pada keandalan (*Reliability*). Keandalan (*Reliability*) erat kaitannya dengan peluang (*Probability*). Dalam aktualisasinya, konsep keandalan lebih banyak menjelaskan tentang peluang kegagalan komponen, bahkan sering digunakan dalam prosedur desain pengendalian kegagalan.





Saat ini dikenal bahwa mayoritas terbesar kegagalan mekanik adalah hasil dari kombinasi kepecahan (fracture), kelelahan (fatigue), korosi dan proses degradasi material. Agar supaya pemeliharaan suatu tingkat integritas struktur dapat diterima dalam struktur modern dan komponen yang besar, maka subjek perhatian pada kondisi layanan permintaan, desain dan rekayasa sistem yang menunjukkan suatu perhatian yang lebih pada proses yang merusak dan dalam cara mengatasi terjadinya kegagalan mekanik ini, (Provan, 1987).

Sayangnya, kesulitan pengukuran menjadi masalah utama ketika dilakukan pengujian masa pengoperasian untuk memperkirakan parameter desain. Padahal pengujian begitu mahal atau tidak sederhana pekerjaannya yang mana perencanaannya mengandalkan data dari komponen pengujian laboratorium dan material uji yang relatif sederhana. Bahkan data yang dihasilkan pun sangat besar kuantitas penyebarannya daripada sifat dasar pada kondisi pengujian yang berbeda. Akan tetapi dengan variabel test beberapa pengendali, masih tersisa perbedaan besar data penyebaran dalam hasil pengujian tersebut yang tergabung dalam mikrostruktur material itu sendiri. Mikrostruktur ini mengikuti pola distribusi acak yaitu cacat las menyerupai pola-pola geometris, impurity atoms, sistem slip, ukuran kristal, parameter batas serat dan cacat makro misalnya porosity, retak dan cacat proses fabrikasi.

Semua menunjukkan bahwa proses kerusakan material secara alami mengikuti pola acak, akan lebih mudah ditentukan dengan pendekatan analisa peluang (*Probabilitas*) daripada pendekatan penentuan sekelompok masalah dengan menggunakan material yang lebih modern dalam desain rekayasa modern.





Salah satu pendekatan yang digunakan untuk menentukan kegagalan mekanik ini adalah dengan menggunakan peluang distribusi weibull. Yaitu fungsi statistik yang menggambarkan sifat peluang kekuatan patah material. Fungsi Weibull kemudian menjadi sering digunakan sebagai pendekatan empiris dalam menentukan waktu sampai gagal suatu model dan hasilnya sangat memuaskan seperti yang telah dicapai oleh *Leiblein dan zelen 1956, Kao 1956 dan Perry 1962* secara berturut-turut dalam tulisan mereka tentang ball-bearing, tabung electron dan transistor. Baik kepecahan maupun kegagalan karena kelelahan menjadi masalah krusial dalam desain, beberapa pendekatan rekayasa lain mengikuti langkah Weibull dan mengusulkan model statistik bahwa ada laju yang konstan dalam ukuran dan tingkat kerumitannya.

Banyak pendekatan yang diusahakan untuk menyediakan sumber-sumber model keandalan sebagai dasar penggambaran peluang akibat proses kelelahan. Seperti yang dilakukan *Birnbaum dan Saunders, 1969*, dalam tulisannya tentang distribusi masa pada sifat kegagalan karena penjaran retak lelah. Sedang, *Payne 1972* mengenalkan suatu model keandalan statistik untuk memperkirakan kekuatan kelelahan struktur aircraft dengan mengevaluasi keragaman acak dalam laju penjaran retak dan kekuatan sisa struktur yang retak pada beberapa keadaan selama perkembangannya.

Untuk lebih mendapatkan hasil yang optimum dengan waktu yang relatif singkat, akan dilakukan pembuatan program dengan bahasa pemrograman visual basic untuk menampilkan hasil input data percobaan fatigue yang telah dilakukan berupa cycle beban dan geometri retak yang terjadi. Hasil inilah yang akan



dianalisa seberapa besar peluang terjadinya retak masing-masing spesimen saat mendapatkan beban tersebut.

## **1.2 TUJUAN**

Adapun tujuan yang akan dicapai dalam penulisan Tugas Akhir ini adalah

1. Memperkirakan penjararan retak yang terjadi pada sambungan Butt-Joint Baja SS 41 standar ASTM akibat adanya cacat las yang berbentuk elips.
2. Menentukan peluang keandalan sambungan Butt-Joint Baja SS 41 akibat penjararan retak dengan menggunakan distribusi Weibull.
3. Untuk menyediakan informasi data peluang keandalan sambungan las untuk inspeksi selanjutnya secara tepat, mudah dan nyaman.

## **1.3 MANFAAT**

Berdasarkan kajian yang dilakukan ini, diharapkan dapat diperoleh petunjuk tentang peluang keandalan sambungan Butt-joint Baja SS 41 yang mempunyai cacat las dalam periode tertentu selama masa pengoperasiannya. Dari hasil ini maka dapat dijadikan masukan dalam menentukan integritas struktur sambungan las baja SS 41 selama masa pengoperasiannya sehingga hal-hal yang membahayakan dapat dicegah. Hal lain yang penting adalah sebagai acuan dalam penentuan periode inspeksi yang harus dilakukan.





#### **1.4 BATASAN MASALAH**

Untuk lebih menyederhanakan permasalahan ini maka beberapa batasan masalah perlu diberikan :

1. Analisa peluang dengan distribusi Weibull yang ditulis dalam bahasa pemograman visual basic.
2. Cacat las adalah berbentuk elips.
3. Baja yang digunakan adalah SS 41.
4. Pengaruh korosi diabaikan. Sistem pelindung korosi dianggap bekerja dengan baik.
5. Dianggap tidak ada tegangan sisa akibat pengelasan.
6. Mode pembebanan yang dipakai adalah Mode I (arah pembebanan tegak lurus dengan arah penjararan retak dan bidang retak).
7. Beban dinamis yang digunakan adalah dengan amplitudo konstan berbentuk sinusoidal dan Stress Ratio,  $R = 0$ .

#### **1.5 METODOLOGI PENELITIAN**

Dalam pelaksanaan penelitian Tugas Akhir ini diperlukan adanya suatu metodologi penelitian yang digunakan sebagai acuan penulis untuk melaksanakan penelitian secara ilmiah. Metodologi penelitian yang penulis gunakan adalah sebagai berikut:

- a. Penentuan geometri sambungan Butt-Joint Baja SS 41
- b. Menentukan variasi beban berulang berupa siklus tegangan.

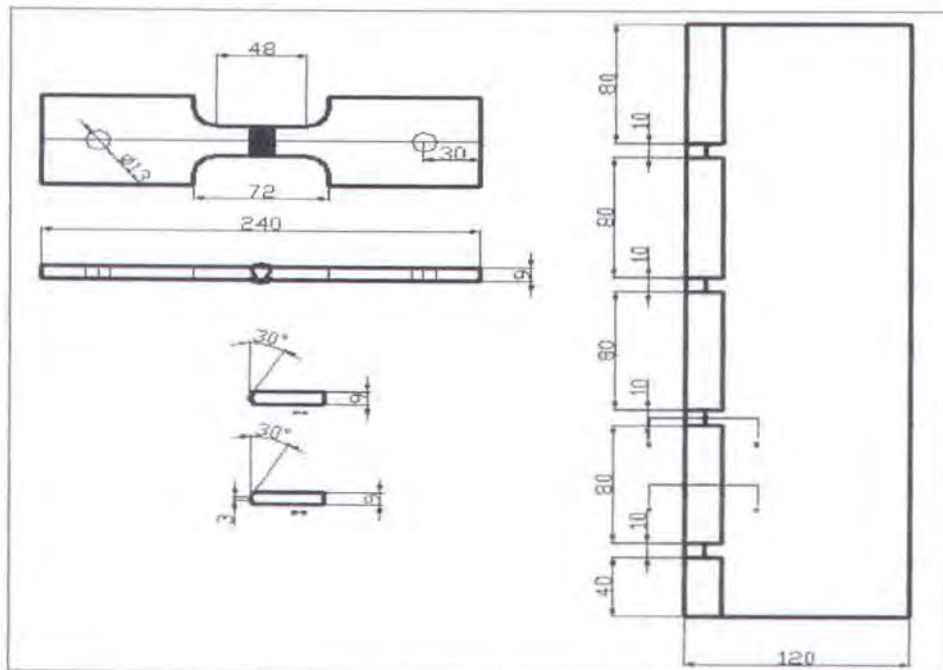


- c. Melakukan perhitungan pertumbuhan retak pada sambungan Butt-Joint Baja SS 41 dengan menerapkan metode Mekanika Kepecahan.
- d. Memformulasikan hubungan antara perambatan retak, cycle tegangan lelah dengan ketahanan konstruksi sambungan las dengan defect sesuai format metode Weibull untuk melakukan analisa keandalan. Format weibull dianalisa dengan program Visual Basic.

Hasil analisa berupa petunjuk tentang peluang kegagalan konstruksi sambungan Butt-Join Baja SS 41 akibat adanya perambatan retak dalam kurun waktu tertentu.

- e. Penyusunan laporan

## 1.6 GEOMETRI SAMBUNGAN LAS BUTT - JOINT



Gambar I.1. Spesimen uji fatigue sesuai standar ASTM





## Bab II

### Dasar Teori



## BAB II

### DASAR TEORI

Sekitar 90 % dari semua kerusakan (patah, putus dan lain sebagainya) yang terjadi pada bagian benda atau struktur dalam menjalankan fungsinya disebabkan oleh kelelahan bahan atau fatigue. Fatigue adalah kerusakan yang terjadi pada struktur yang mendapat beban berulang-ulang (*repeated load*). Ada tiga tingkat / fase dalam sebuah kerusakan / patah karena kelelahan bahan (*fatigue*) yaitu: keretakan awal (*crack initiation*), keretakan bertambah / meluas (*crack propagation*) dan berakhir dengan patah. Kekuatan bahan dalam menahan kelelahan berkurang dengan sangat berarti apabila ada sebuah bagian yang merupakan tempat terkumpulnya tegangan (*stress raises*), seperti sebuah keratan (*notch*) atau sebuah lubang (*hole*), (ImarE, feb 2003).

#### 2.1 KONSEP PEMBEBANAN STATIS DAN DINAMIS

Suatu konstruksi dapat mengalami kepecahan meskipun beban yang diterimanya dibawah ultimate tensile strength. Hal ini dapat terjadi karena beban yang diterimanya berlangsung secara periodik. Beban ini disebut *beban dinamis*. Ketahanan material terhadap beban dinamis bergantung pada besar beban, kekuatan material dan jenis material. Ketahanan ini disebut *fatigue life* biasanya digunakan dalam satuan *cycle*.

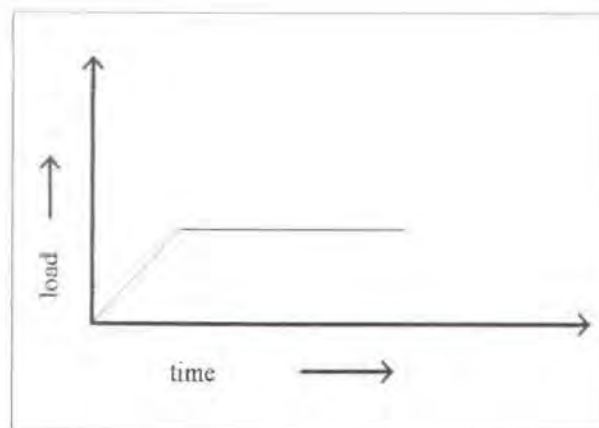




Untuk itu suatu struktur direncanakan untuk dapat menahan beban-beban yang bekerja padanya dan diharapkan tidak terjadi suatu kegagalan. Pembebanan dapat dihubungkan sebagai fungsi waktu dan dikelompokkan menjadi:

### **2.1.1. Pembebanan Statis**

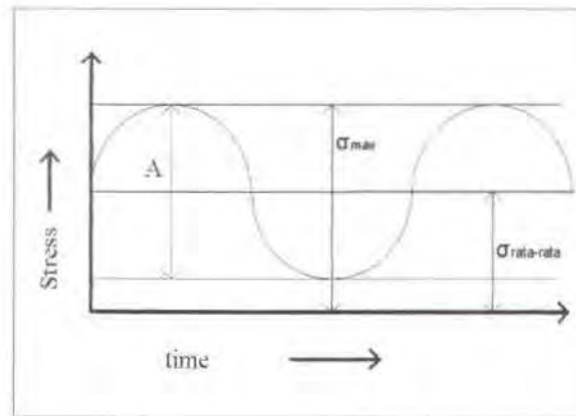
Pembebanan statis adalah pembebanan yang besarnya tetap tanpa ada perubahan dalam siklus waktunya. Beban yang bekerja mencapai suatu harga tertentu dan kemudian harga beban dipertahankan sampai beberapa waktu tertentu.



Gambar II.1. Grafik pembebanan statis

### **2.1.2. Pembebanan Dinamis**

Pembebanan dinamis adalah pembebanan – pembebanan yang dilakukan berulang-ulang (periodik) dimana sebagian atau seluruhnya terulang sebagai fungsi waktu  $t$ .



Gambar II.2. Definisi istilah dalam pembebanan dinamis

Pada gambar II.2 memperlihatkan siklus pembebanan dinamis. Sumbu x menunjukkan fungsi waktu. Sedangkan sumbu y menunjukkan stress atau tegangan. Dalam grafik terdapat beberapa istilah dan parameter yang perlu diketahui yaitu:

- Tegangan maksimum,  $\sigma_{\max}$** , adalah tegangan yang mempunyai harga tertinggi dalam suatu siklus beban.
- Tegangan minimum,  $\sigma_{\min}$** , adalah tegangan yang mempunyai harga terendah dalam satu siklus beban.
- Tegangan rata-rata,  $\sigma_m$** , adalah setengah dari penjumlahan tegangan maksimum dan tegangan minimum.

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) \quad (2.1)$$

- Amplitudo tegangan, A**, adalah setengah dari selisih tegangan maksimum dan tegangan minimum.

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \quad (2.2)$$





- e. **Jumlah siklus pembebanan**, jumlah siklus pembebanan dilambangkan dengan  $N$ . Dalam grafik biasanya digambarkan dalam bentuk log sehingga membentuk garis lurus.
- f. **Laju pengulangan beban**, yaitu banyaknya pembebanan yang terjadi dalam satu satuan waktu. Dinyatakan dalam perdetik atau disebut dengan frekwensi.
- g. **Ratio beban, stress ratio,  $R$** , yaitu perbandingan antara tegangan minimum dengan tegangan maksimum atau beban minimum terhadap beban maksimum dalam satu siklus pembebanan.

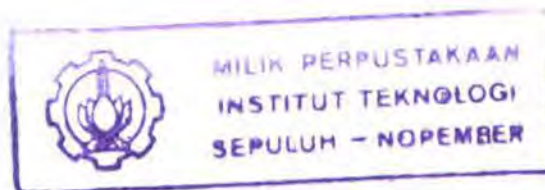
Berdasarkan besarnya amplitudo, pembebanan dibedakan:

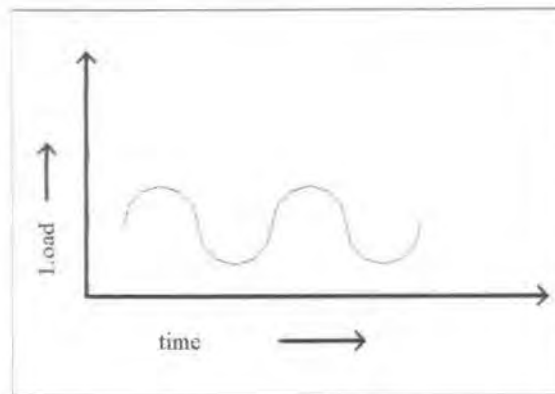
- a. Amplitudo bervariasi (variable amplitude).
- b. Amplitudo konstan (constan amplitude).
- c. Acak (random).

Berdasarkan macam bentuk gelombang pembebanan dibedakan:

- 1. Sinusoidal (sinh wave form)

Bentuk gelombang pembebanan ini adalah dalam bentuk sinus. Seperti terlihat pada gambar di bawah ini, beban akan meningkat dari beban minimum ke beban maksimum dengan slope sesuai dengan sinus.

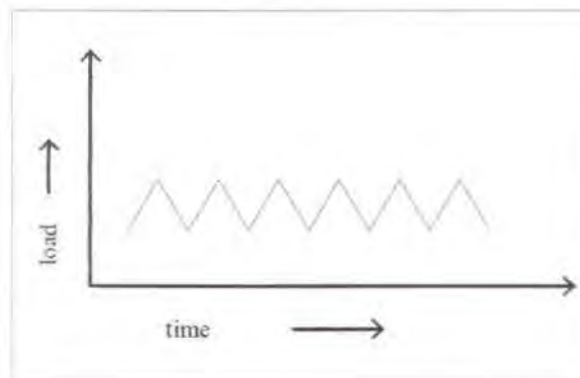




Gambar II. 3. Pembebanan sinusoidal

2. Segitiga (triangular wave form)

Pada bentuk pembebanan jenis ini terjadi perubahan tegangan yang tiba-tiba setelah mencapai harga maksimum dan minimum dari siklus pembebanannya. Perubahan ini terjadi dengan kemiringan yang tetap, dimana merupakan pencerminan terhadap sumbu tegak pada setengah periode sebelumnya. Perubahan ini terjadi berulang-ulang seperti siklus sebelumnya.



Gambar II.4. Pembebanan segitiga

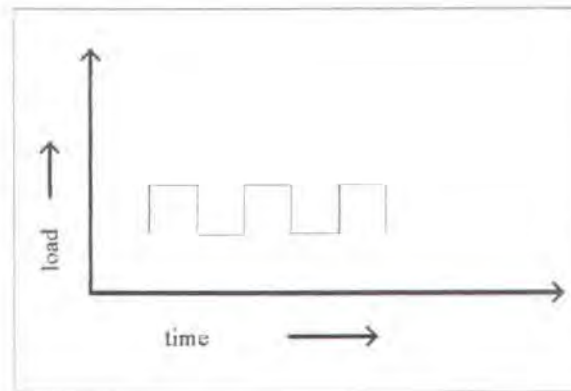
3. Persegi (square wave form)

Mekanisme dari bentuk pembebanan ini adalah suatu tegangan minimum tertentu secara statis konstan yang bekerja sampai setengah dari periode





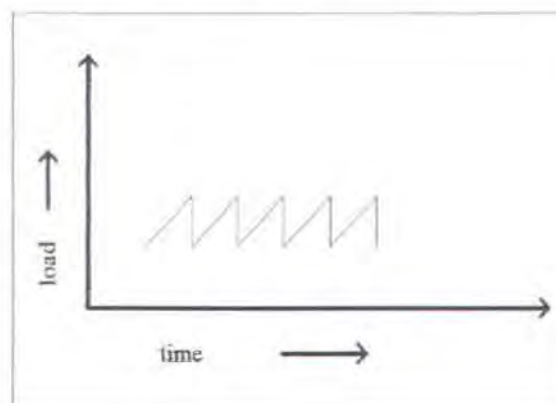
siklus kemudian berubah dengan cepat sampai harga maksimum tertentu sampai akhir setengah periode berikutnya. Siklus ini akan berulang seperti sebelumnya.



Gambar II.5. Pembebanan segiempat

4. Gergaji positif (positive sawtooth wave form)

Pembebanan dengan bentuk gelombang gergaji positif. Suatu harga tegangan minimum tertentu akan meningkat dengan kemiringan tertentu sampai mencapai harga tegangan maksimumnya. Setelah harga maksimumnya tercapai tegangan dengan tiba-tiba berubah dengan cepat sampai harga minimumnya, siklus ini terulang sebagaimana sebelumnya.

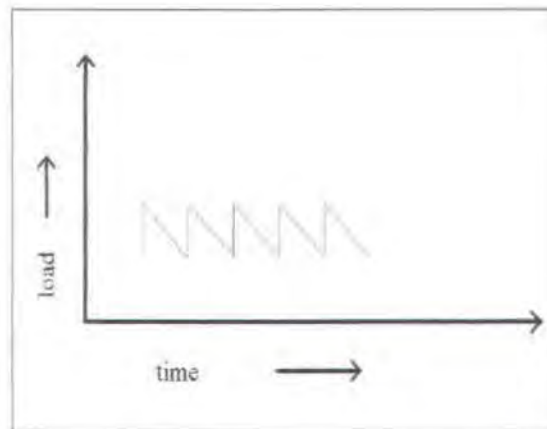


Gambar II.6. Pembebanan gergaji positif



5. Gergaji negatif (negatif sawtooth wave form)

Pembebanan ini merupakan kebalikan dari jenis pembebanan gergaji positif. Setelah mencapai suatu harga tegangan minimum tertentu perubahan yang tiba-tiba sampai terjadi harga maksimum tertentu dan kemudian turun dengan kemiringan tertentu dengan relatif lebih lambat sampai pada harga tegangan minimumnya, siklus ini berulang seperti sebelumnya.

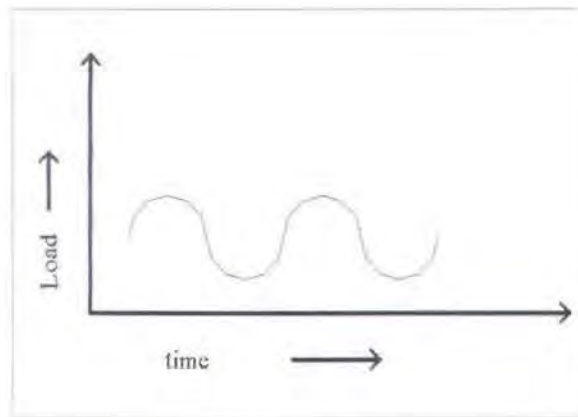


Gambar II.7. Pembebanan gergaji negatif

Seperti disebutkan di muka, dalam suatu siklus pembebanan berulang, harga perbandingan antara tegangan minimum dengan tegangan maksimum yang bekerja disebut dengan perbandingan siklus atau stress ratio yang dilambangkan dengan  $R$ . Berdasarkan harga  $R$  dan tegangan rata-rata pembebanan dengan amplitudo konstan dapat dibedakan dalam beberapa jenis, yaitu:

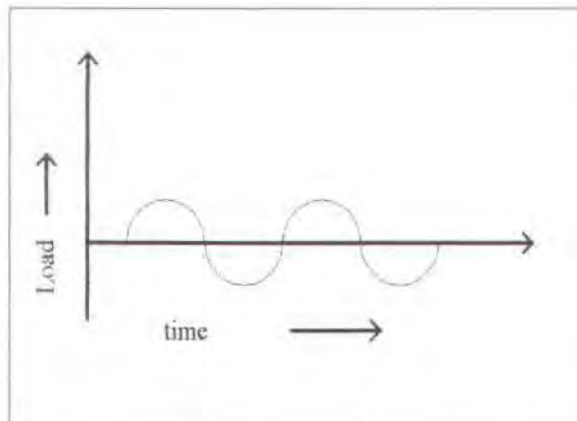
- Tegangan diatas sumbu nol, hal yang demikian menunjukkan bahwa harga tegangan minimum dan tegangan maksimum adalah positif atau disebut juga tegangan tarik. Pembebanan jenis ini merupakan pembebanan tarik yang bekerja membesar dan mengecil dan berulang-ulang atau juga tension to tension loading.





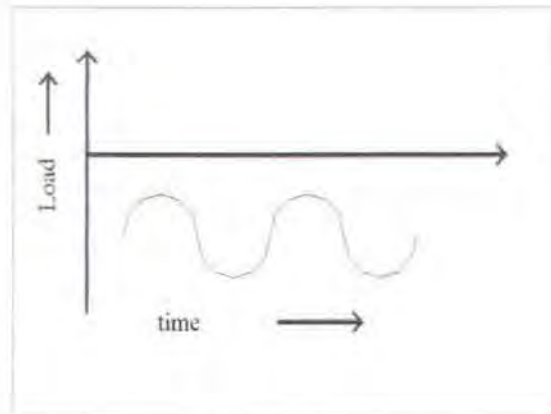
Gambar II.8. Pembebanan di atas sumbu nol

- Tegangan melewati sumbu nol, pada pembebanan jenis ini tegangan minimum yang bekerja adalah tegangan tekan atau tegangan negatif, sedangkan tegangan maksimumnya adalah tegangan tarik atau tegangan positif.



Gambar II.9. Pembebanan melewati sumbu nol

- Tegangan dibawah sumbu nol, hal ini menunjukan bahwa tegangan maksimum dan tegangan minimum adalah tegangan negatif atau tegangan tekan.



Gambar II.10. Pembebanan dibawah sumbu nol

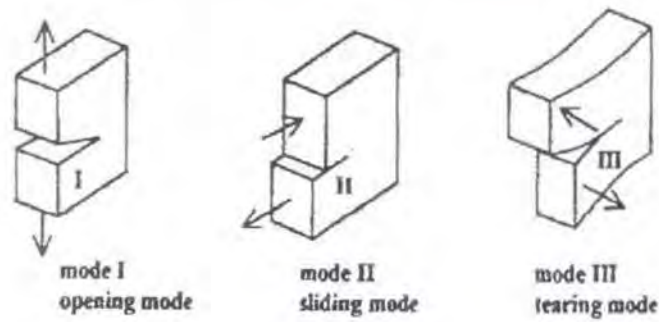
Dalam penulisan Tugas Akhir lebih difokuskan pada pembebanan dinamis dengan bentuk sinusoidal diatas sumbu nol dan rasio tegangannya,  $R = 0$ .

## 2.2 KONSEP MEKANIKA KEPECAHAN (FRACTURE MECHANIC)

Pendekatan dengan metoda Fracture Mechanic didasarkan pada asumsi yang lebih mendekati kondisi fisik struktur. Metoda ini menyatakan bahwa suatu cacat biasa muncul (*inherent*) dalam pengelasan. Cacat/retak yang besar dapat dideteksi pada saat inspeksi, tapi yang berukuran kecil akan sulit terdeteksi sehingga akan tetap tertinggal. Disamping asumsi-asumsi seperti arah dan bentuk retak dapat disederhanakan dalam perhitungan (*Thebault, et al., 1980*).

### 2.2.1. Tegangan di Ujung Retak

Dalam kajian mekanika kepecahan, retak dapat digolongkan dalam tiga mode deformasi retak (*Broek, 1982*), seperti terdapat pada gambar (II.11):



Gambar II.11. Tiga mode deformasi retak (Broek, 1984)

Pada mode I (*opening mode*), retak yang diakibatkan oleh adanya tegangan tarik yang tegak lurus terhadap arah/bidang penjalaran retak. Mode II (*sliding mode*), retak yang diakibatkan oleh tegangan geser yang searah dengan penjalaran retak. Mode III (*tearing mode*), retak yang diakibatkan karena tegangan geser yang bekerja pada arah melintang dan membentuk sudut dengan arah penjalaran retak. Dalam kenyataannya bentuk mode I-lah yang paling banyak berpengaruh dalam menyumbang terjadinya perambatan retak.

Untuk model I, medan tegangan yang terjadi pada kondisi seperti pada persamaan dibawah ini:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \sigma_z &= 0 \quad (\text{plane stress}) \\ \sigma_z &= \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (\text{plane strain})\end{aligned} \tag{2.3}$$





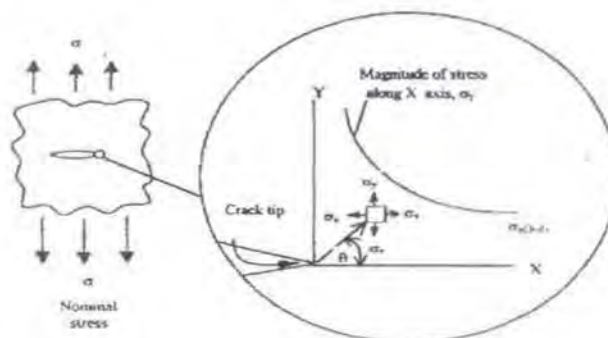
Sedang untuk mode II, persamaan tegangan di ujung retak adalah:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left[ 2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] \\ \sigma_y &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left[ \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] \\ \tau_{xy} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\ \sigma_z &= \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (\text{plane strain}) \\ \tau_{xz} &= \tau_{yz} = 0\end{aligned}\tag{2.4}$$

Demikian pula untuk mode III:

$$\begin{aligned}\tau_{xz} &= \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \\ \tau_{yz} &= \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \\ \sigma_z &= \sigma_y = \sigma_x = 0\end{aligned}\tag{2.5}$$

Dari persamaan di atas dijumpai K, yaitu faktor intensitas tegangan (*angka romawi menyatakan mode retak*). Bila K diketahui, medan tegangan di ujung retak akan dapat diketahui pula.



Gambar II.12. Medan tegangan di ujung retak (Almar-Naess, 1985)



Persamaan-persamaan di atas menunjukkan bahwa tegangan elastis di dekat ujung retak tergantung pada  $r$ ,  $\theta$  dan  $K$ . Distribusi tegangan disekitar retak tergantung pada nilai  $r$  dan  $\theta$ , sedangkan besarnya pada tiap-tiap posisi tergantung pada  $K$ . Satu hal penting yang harus diketahui adalah bahwa harga  $K$  tidak dependen / bergantung pada material dan koordinat posisinya, tapi  $K$  bergantung pada beban luar, geometri eksternal dan geometri retak (ukuran dan bentuk). Dengan demikian  $K$  menunjukkan hubungan antara respon ujung retak lokal dan kondisi yang lebih global seperti terdapat pada gambar II.3 (*Almar-Naess, 1985*).

Oleh karena retak kelelahan cenderung untuk merambat dalam arah tegak lurus tegangan utama, maka mode I adalah yang akan menjadi acuan pembahasan penulisan Tugas Akhir ini. Dengan demikian semua persamaan dalam mode I dapat dipakai.

### 2.2.2. Model Pertumbuhan Retak

Pada beban amplitudo konstan penambahan ukuran pertumbuhan retak ( $\Delta a$ ) selama satu siklus pembebanan (*load cycle*) berkaitan dengan rentang faktor intensitas tegangan  $\Delta K$  untuk siklus pembebanan tersebut. Hubungan ini dinyatakan dalam formulasi Paris dan Erdogan sebagai berikut (*Madsen, et al., 1987*):

$$\Delta a = C(\Delta K)^m \quad (2.6)$$

Penambahan retak dalam satu siklus biasanya sangat kecil dibandingkan dengan ukuran retak. Karena itu persamaan 2.6 dapat ditulis dalam bentuk sebagai berikut:



$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.7)$$

Rentang faktor intensitas tegangan ( $\Delta K$ ) disebabkan oleh beban siklis dan merupakan fungsi dari distribusi tegangan dan geometri sambungan serta retakan. Selanjutnya  $\Delta K$  dapat diekspresikan sebagai suatu fungsi rentang total tegangan sepanjang tebal dinding.

$$\Delta K = Y(a)\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.8)$$

Faktor modifikasi intensitas tegangan ( $Y$ ) dapat diperoleh dengan beberapa macam model mekanika kepecahan. Beberapa pendekatan model telah dicoba dimasa lalu dengan tingkat keberhasilan yang bervariasi.

Hasil perhitungan perambatan retak ini umumnya ditunjukkan sebagai umur kelelahan dari struktur yang ditinjau. Dengan memberikan masukan berupa besar retak awal dan retak akhir akan diketahui jumlah batas siklus yang masih aman dengan mengintegalkan persamaan laju keretakan dari persamaan 2.7 berikut ini:

$$N_p = \int_{a_i}^{a_f} [C(\Delta K)^m]^{-1} da \quad (2.9)$$

### 2.2.3 Faktor Intensitas Tegangan

Dalam rangka menghitung fatigue life dari sambungan las yang mempunyai cacat, berarti kita menganalisa menjalarnya cacat dari selebar cacat awal sampai selebar tebal pelat yang dilas tersebut. Faktor yang menentukan menjalarnya retak adalah Stress Intensitas Factor (faktor intensitas tegangan). Untuk sambungan





pelat dengan jenis cacat berbentuk elip, *Radaj* memformulasikan suatu pendekatan faktor intensitas tegangan di ujung retak sebagai berikut:

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad X_o^{(-)} \left( 1 + (X_o^{(1)} - 1) + (X_o^{(2)} - 1) + (X_o^{(3)} - 1) \right) \quad (2.10)$$

Dengan harga;

$$X_o^{(-)} = X_u^{(-)} = \frac{1}{\left[ 1 + 1.47 \left( \frac{a}{c} \right)^{2.64} \right]^{0.5}}$$

Dimana;

$\alpha$  = setengah lebar retak;

$c$  = setengah panjang retak;

$X_o^{(1)}, X_o^{(2)}, X_o^{(3)}$ , adalah faktor koreksi yang didapat dari grafik gambar II.13, II.14 dan II.15.

$\Delta \sigma$  = stress range yang harganya adalah  $\sigma_{\text{maks}} - \sigma_{\text{min}}$  yaitu stress maksimum dan stress minimum yang diterima oleh retak.

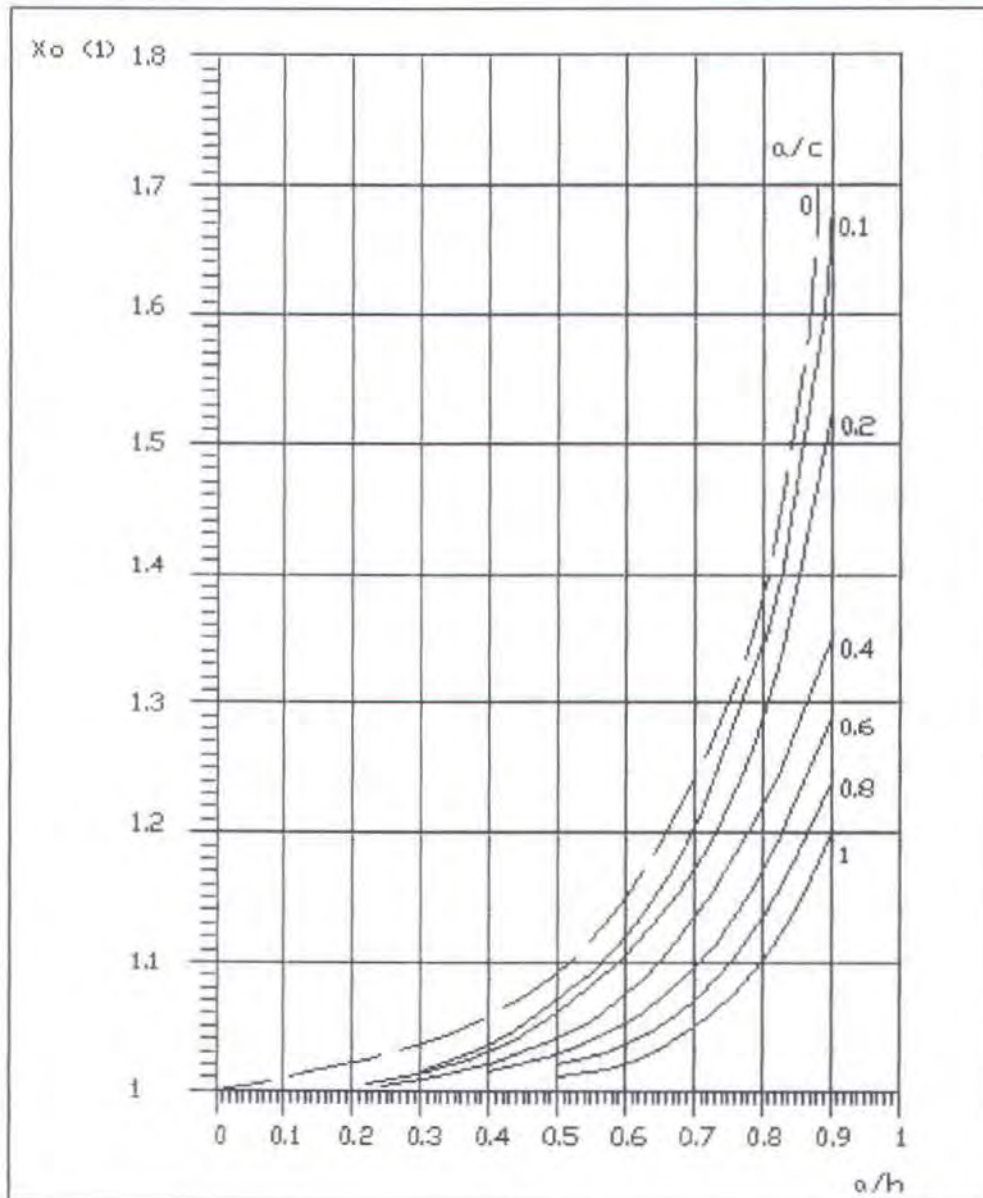
Pada beban berulang apalagi alternating, yaitu tension to compression tidak seluruh stress menimbulkan menjalarnya crack pada waktu compression diperkirakan crack malah akan menutup tidak membuka sehingga perhitungan K tidak boleh menggunakan  $\sigma$ , akan tetapi efektif tegangan yang mengakibatkan menjalarnya retak yaitu  $\sigma_{\text{eff}}$ . Sampai sekarang penentuan  $\sigma_{\text{eff}}$  masih tetap diperdebatkan akan tetapi semua peneliti sepakat bahwa harga dari efektif stress adalah:

$$\Delta \sigma_{\text{eff}} = U \Delta \sigma \quad (2.11)$$

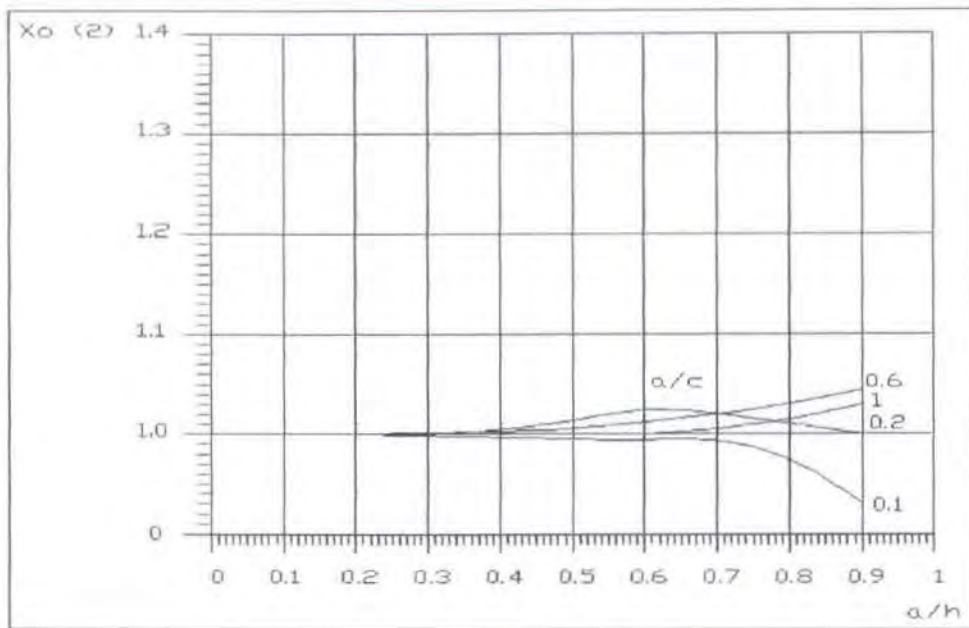


dengan,  $U = \frac{1}{1-R}$  sedangkan R adalah rasio dari  $\sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ .

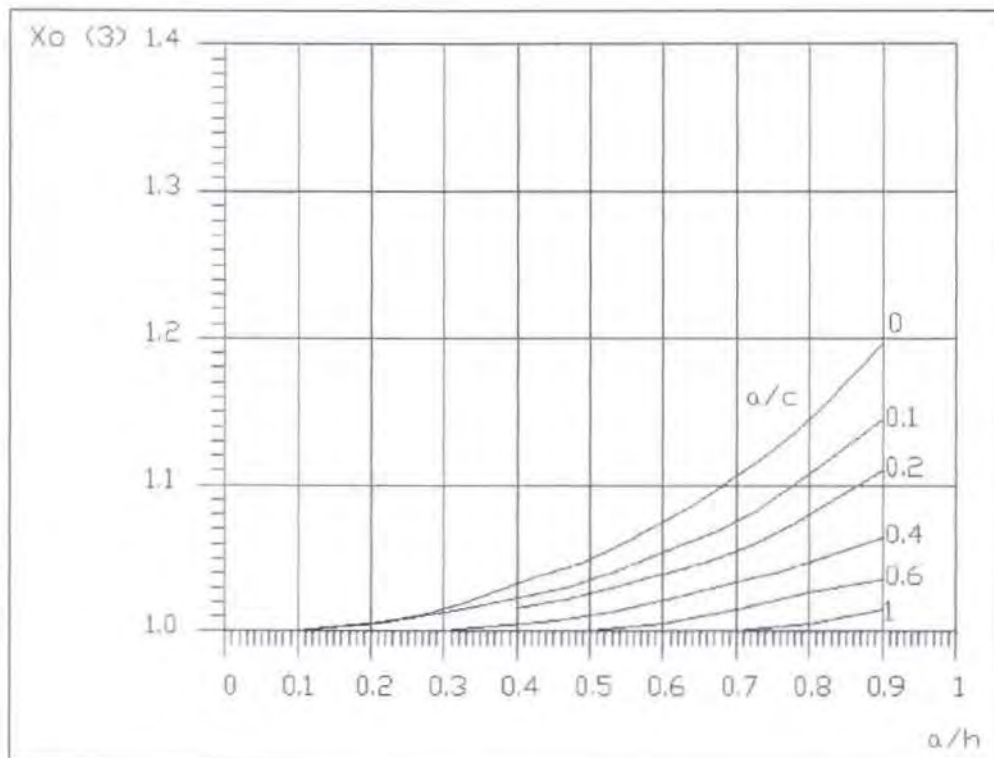
Disini kelihatan seolah-olah tegangan yang menimbulkan perpanjangan retak adalah pada waktu tension saja dan rumus ini berlaku hanya untuk  $-1 \leq R \leq 0$ .



Gambar II.13. Faktor koreksi  $X_o^{(1)}$



Gambar II.14. Faktor koreksi  $X_0^{(2)}$



Gambar II.15. Faktor koreksi  $X_0^{(3)}$





### 2.3 PENGERTIAN DASAR FATIGUE

Fatigue adalah salah satu mode kegagalan yang harus dipertimbangkan dalam mendesain suatu struktur, bahkan ada dalam beberapa literatur menyebutkan bahwa 50% - 90% dari seluruh kegagalan mekanis disebabkan oleh fatigue. Fatigue adalah mekanisme yang terjadi sebagai suatu hasil dari sejumlah pembebanan berulang-ulang. Suatu pembebanan tunggal akan tidak mempengaruhi kekuatan suatu struktur. Tetapi jika pembebanan tersebut terjadi berulang-ulang, maka kegagalan fatigue akan terjadi (*Broek, 1982*).

Definisi dari fatigue atau kelelahan ini, menurut ASTM (American Society for Testing Material) E 206 hal 364 adalah:

Suatu **proses progresif** yang terjadi **pada suatu area struktur** permanen dimana terjadi perubahan pada material yang disebabkan suatu kondisi yang menghasilkan fluktuasi tegangan dan regangan pada suatu atau beberapa titik yang dapat memuncak menjadi **retak** atau **kepecahan** atau **kegagalan struktur** secara keseluruhan setelah sejumlah fluktuasi tertentu.

Terdapat empat kata penting dari definisi diatas yang dapat menjelaskan tentang pengertian kelelahan atau fatigue. Dapat juga dikatakan bahwa keempat kata tersebut menjelaskan tahapan terjadinya suatu kelelahan. Keempat hal tersebut adalah:

Kata "**Progresif**" yang menjelaskan bahwa proses fatigue terjadi pada suatu periode waktu dan pemakaian tertentu. Kegagalan fatigue sering terjadi secara mendadak tanpa ada peringatan sebelumnya. Walaupun demikian mekanisme ini melibatkan sejak awal beroperasinya suatu komponen atau struktur.



Kata ***“terjadi pada suatu area”***, menjelaskan bahwa proses fatigue berlangsung pada suatu bagian tertentu dari suatu struktur bukan pada keseluruhan komponen atau struktur. Bagian lokal ini dapat mengalami tegangan atau regangan yang tinggi disebabkan beban eksternal, perubahan geometris, perbedaan temperatur atau ketidaksempurnaan material.

Kata ***“retak”***, penyebab utama dari seluruh kegagalan fatigue adalah yang merambat sampai pada suatu titik dimana material tidak sanggup lagi menahan tegangan atau regangan dan kegagalan struktur pun terjadi.

Kata ***“kepecahan atau kegagalan struktur”*** menjelaskan bahwa kondisi terakhir dari suatu proses fatigue adalah pemisahan dari komponen atau struktur menjadi dua bagian atau lebih. Mekanisme perambatan retak secara umum dapat diasumsikan bahwa jika stress terjadi pada ujung retak melampaui suatu harga kritis tertentu. Mekanisme kepecahan (fracture mechanics) dipakai untuk menjelaskan tentang suatu kriteria kepecahan yaitu menjelaskan stress dan strain yang terjadi pada ujung retak atau notch, meskipun untuk kondisi di bawah keadaan stress dan strain yang menyebabkan penjararan retak belum dapat dijelaskan dengan baik.

## **2.4 MEKANISME KEGAGALAN KELELAHAN SAMBUNGAN LAS**

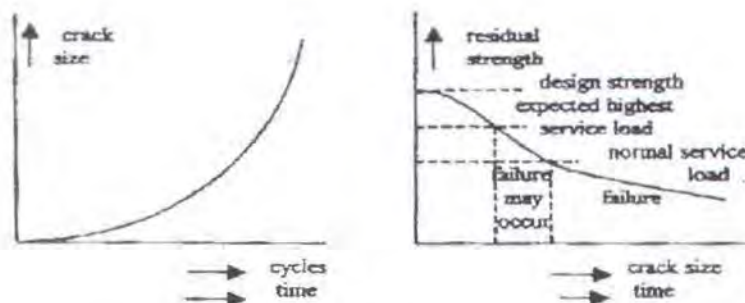
### **2.4.1. Keretakan**

Keretakan biasanya muncul / terdapat pada daerah yang memiliki diskontinuitas. Diskontinuitas ini bisa disebabkan karena geometri struktur, proses



pengerjan material seperti pengelasan yang menyebabkan porositas, slag, inclusion, incomplete penetration dan lain-lain. Di daerah ini tegangan tinggi akan terkonsentrasi.

Adanya retak ini akan menyebabkan kekuatan struktur akan menurun seiring dengan bertambahnya panjang retak dan menjadi lebih rendah dari kekuatan desain awal hingga pada suatu saat kekuatan sisa menjadi begitu rendah sehingga tidak mampu menahan beban-beban tinggi yang datang secara mendadak yang memungkinkan struktur gagal saat operasi. Jika beban tinggi tidak terjadi, maka kemungkinan besar panjang retak berkembang lebih besar dari yang ditemukan saat inspeksi hingga kekuatan sisa sangat rendah dan kegagalan terjadi dibawah beban normal operasi.



Gambar II.16. Kurva perambatan retak dan penurunan kekuatan akibat retak

(Broek, 1982)

#### 2.4.2 Pertumbuhan Retak Akibat Kelelahan pada Sambungan Butt-Joint

Kelelahan atau fatigue dalam prosesnya mengalami beberapa tahapan atau fase yang terjadi selama umur kelelahan material, beberapa fase tersebut adalah (Hellan, 1985):





1. Cyclic slip (penggelinciran berulang),

Pada pembebanan berulang yang relatif rendah (rendah dibandingkan dengan beban kegagalan statis), suatu gelinciran berulang akan terjadi yang tersusun dari sejumlah kecil butiran polycrystallina material tersebut. Jika gelinciran berulang tidak terjadi maka fatigue pun tidak terjadi.

2. Crack nucleation (retak inti),

Penyelidikan mikroskopis menyebutkan crack nucleation terjadi pada awal umur kelelahan material, mungkin hanya berapa persen setelah umur kelelahan terlampaui. Penelitian lain menyatakan bahwa crack nucleation adalah fenomena permukaan suatu material.

3. Perambatan retak mikro,

Timbulnya retak mikro menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan pada ujung retak. Gelinciran berulang akan terkonsentrasi pada ujung retak yang menyebabkan penjararan retak selanjutnya. Penelitian mikroskopis menunjukkan bahwa perambatan retak mikro dapat meliputi sebagian besar dari umur kelelahannya, dengan kata lain, pada saat terakhir dari umur kelelahannya, retak menjadi dapat dilihat dengan mata telanjang.

4. Perambatan retak makro,

Perubahan dari perambatan retak mikro ke retak makro tidak mudah didefinisikan secara kuantitatif. Definisi secara nominal dari retak makro adalah jika suatu retak dapat dilihat dengan mata telanjang. Sebagai tambahan dari apa yang telah disebutkan sebelumnya tentang umur kelelahan pada daerah retak mikro adalah perambatan retak makro berlaku



jika tingkat perambatannya tidak tergantung lagi pada permukaan lokal dan kondisi seperti pada crack nucleation dan perambatan retak mikro.

5. Kegagalan akhir

Pada saat retak makro berkembang besar, penampang melintang dari material yang tidak retak (ligament) menjadi mengecil, akhirnya daerah ini akan menjadi terlalu kecil untuk menahan beban statis maksimumnya. Kemudian kegagalan akhir akan terjadi pada siklus pembebanan terakhir dari umur kelelahannya.





## Bab III

# Analisa Probabilitas Kegagalan Sambungan Las Dengan Defect





### **BAB III**

## **ANALISA PROBABILITAS KEGAGALAN**

### **SAMBUNGAN LAS DENGAN DEFECT**

Cacat pada sambungan las sering kali muncul, meskipun prosedur pengelasan yang digunakan sudah memenuhi ketentuan. Retak makro dapat bermula dari cacat ini. Pada kondisi pembebanan bervariasi, retak ini akan tumbuh hingga mencapai ukuran kritis, menyebabkan suatu struktur mengalami kegagalan. Faktor-faktor yang berkaitan erat dengan pertumbuhan retak ini adalah: geometri struktur, karakteristik material, kondisi lingkungan dan pembebanan. Secara umum kondisi faktor-faktor diatas adalah acak. Metode probabilistik adalah sesuai digunakan untuk kondisi-kondisi tersebut. Beberapa peneliti telah menggunakan metoda ini dalam tulisannya seperti *Payne (1972)* menyelidiki tentang model statistik kekuatan lelah struktur, *Provan and Therlault (1982)* yang masing-masing berkaitan erat dengan masalah keandalan pada kelelahan / fatigue.

#### **3.1 KONSEP KETIDAKPASTIAN**

Banyak sumber ketidakpastian yang sering muncul (*inherent*) dalam suatu desain struktur. Meskipun apa yang sering kita pikirkan, parameter pembebanan dan kapasitas beban yang dapat diterima suatu komponen struktur tidak ditentukan kuantitasnya. Ketidakpastian ini merupakan variabel acak, sehingga keamanan absolut (atau peluang kegagalan sama dengan nol) tidak dapat dicapai.



Oleh karena itu, struktur harus didesain untuk melaksanakan fungsinya dengan suatu peluang kegagalan terukur untuk mendapatkan hasil yang lebih tepat dan akurat. Untuk menghitung ketidakpastian pada suatu struktur dengan analisa metode keandalan, perlu didefinisikan tentang perubah dasar (*basic variable*).

Perubah dasar adalah sekumpulan besaran dasar yang menghasilkan tanggapan (*response*) statis maupun dinamis dari struktur. Macam-macam perubah dasar ini adalah: sifat mekanis material, ukuran, beban lingkungan, dan sebagainya. Semua ini dipakai secara fundamental oleh perencana dalam perhitungan struktur. Selain itu, dalam analisa sistem bangunan maka perlu untuk mendefinisikan ketidakpastian yang diterima struktur.

Ketidakpastian ini dapat dibagi dalam tiga bagian (*Rosyid, 1996*):

1. Ketidakpastian Fisik, yaitu ketidakpastian yang berhubungan dengan keragaman (*variability*) fisik seperti: beban, sifat material, dan ukuran material. Keragaman fisik hanya bisa dinyatakan dalam contoh data dengan pertimbangan praktis dan ekonomis.
2. Ketidakpastian Statistik, yaitu ketidakpastian yang berhubungan dengan data-data yang dipakai untuk membuat model secara probabilistik dari berbagai macam keragaman fisik diatas. Data-data ini harus ditentukan jenis distribusi probabilitasnya serta harga-harga parameternya. Parameter-parameter ini dengan sendirinya dianggap sebagai perubah acak, sedangkan ketidakpastian yang tergantung pada data itu disebut ketidakpastian statistik.
3. Ketidakpastian model, merupakan ketidakpastian yang berhubungan dengan tanggapan dari jenis struktur bangunan yang dimodelkan secara matematis





dalam bentuk deterministik atau probabilistik. Ketidakpastian yang terjadi disini hasil dari penyederhanaan dengan memakai bermacam-macam asumsi, kondisi batas yang tidak diketahui, dan diketahuinya pengaruh perubah yang lain serta hubungan perubah-perubah yang tidak tercakup dalam model.

Dalam analisa struktur secara umum, faktor ketidakpastian disebabkan oleh pengukuran atau dugaan terhadap variabel dalam data pengukuran, kejadian yang dapat atau tidak dapat terjadi atau waktu kejadian tidak tentu, dan pemodelan yang menyederhanakan kondisi sesungguhnya. Ketidakpastian data pengukuran disebabkan pengambilan data yang bias, misalnya ketidaktepatan pengukuran tegangan tarik, test kekuatan kelelahan, dan dalam operasi tingkat, laju korosi, dan lain-lain. Kejadian acak jelas banyak didapat dalam lingkungan nyata, seperti gempa bumi, tekanan air, angin, dan lain-lain. Pemodelan yang disederhanakan seringkali tidak dapat dihindarkan karena beberapa keterbatasan dalam pemodelan fenomena fisik serta kompleksitas masalah yang harus dipecahkan. Selain itu, faktor-faktor fabrikasi komponen dan konstruksi suatu sistem juga mempunyai pengaruh besar terhadap ketidakpastian.

Permasalahan ketidakpastian akan lebih mudah diselesaikan dengan ilmu peluang untuk membantu pemikiran yang sistematis. Untuk itu dibuat semua kemungkinan yang disebut ruang sampel dan setiap kejadian sebagai komponen / bagian dari ruang sampel yang disebut kejadian (event) atau titik sampel. Dengan menghubungkan setiap kejadian yang merupakan bilangan antara 0 hingga 1, menunjukkan pengertian hubungan setiap kejadian yang disebut sebagai peluang





kejadian. Bila suatu kejadian diyakini terjadi, maka peluangnya 1, bila diyakini tidak akan terjadi, maka peluangnya 0. Kebanyakan kejadian memiliki peluang dengan nilai diantara 0 dan 1. Dalam persamaan matematis nilai peluang suatu kejadian  $X$  dapat terjadi dituliskan sebagai  $P(X)$ . Keuntungan terbesar penerapan metoda probabilistik yang saat ini lebih dikenal dengan analisa resiko dan keandalan adalah perancang akan dapat menghasilkan suatu sistem rekayasa yang lebih efisien dan juga memenuhi kualitas standar yang diharapkan.

### 3.2 KONSEP ANALISA PELUANG KEANDALAN

Keandalan adalah peluang suatu struktur untuk melakukan fungsi dan tugas yang disyaratkan tanpa mengalami kegagalan selama kurun waktu tertentu apabila dioperasikan dengan benar dalam lingkungan tertentu (Tjahjono, 2000).

Dalam melakukan prediksi keandalan (*Reliability*), distribusi-distribusi yang sering dipergunakan adalah distribusi normal, eksponensial, dan Weibull. Distribusi ini akan mengarahkan pada perhitungan *reliability* melalui fungsi *reliability*. Fungsi *reliability* akan memperlihatkan jumlah keberhasilan dan kegagalan dari item yang diobservasi.

Konsep kondisi batas digunakan untuk mendefinisikan kegagalan itu dalam konteks analisa keandalan struktur. Suatu kondisi batas (*limit state*) adalah suatu batasan antara tingkat harapan dan bukan harapan suatu struktur melaksanakan fungsinya. Batasan ini dalam analisa matematis dikenal sebagai fungsi kondisi batas (*limit state function*). Kinerja yang tidak diharapkan dari struktur dapat terjadi oleh beberapa mode kegagalan seperti retak, corosi, deformasi, beban-



beban yang terjadi yaitu beban geser atau momen bending, dan bukling. Dalam pendekatan mode kegagalan ini, pertimbangan secara terpisah akan lebih memudahkan menganalisa kondisi batas. Analisa keandalan struktur membagi kondisi batas ini menjadi tiga (3) type (*Andrzej and Kevin, 2000*) yaitu:

1. *Ultimate limit states* (ULSS) yaitu kondisi batas maksimum struktur beroperasi, berhubungan dengan berkurangnya kapasitas beban maksimum yang dapat diterima struktur, seperti kepecahan karena pengelasan, bukling, berkurangnya keseimbangan secara meneluruh, kegagalan geser pada struktur, kapasitas momen berlebihan dari yang seharusnya diterima struktur dan kerusakan struktur karena pengaruh tekanan.
2. *Serviceability limit states* (SLSS) yaitu kondisi batas yang masih dapat dipergunakan / dioperasikan dan berhubungan pada semakin berkurangnya fungsi struktur atau karena kerugian selama pemeliharaan. Hal ini secara langsung tidak berhubungan dengan integritas struktur itu sendiri. Beberapa mode kegagalan seperti ini adalah defleksi berlebihan (*excess deflection*) yang masih sering diperdebatkan karena kesesuaian batas adalah subjektifitas dari perancang. Mode kegagalan lainnya adalah getaran yang berlebihan (*excess vibration*) adalah getaran dalam kondisi batas masih dapat diterima akan tetapi kebanyakan sangat sulit untuk diukur. Kriteria yang masih dapat diterima adalah juga merupakan subjektifitas yang tinggi dan menurut persepsi perancang. Mode selanjutnya adalah deformasi permanen (*permanent deformation*) yang berhubungan dengan batasan elastis beban yang berlebihan setiap waktu. Perkiraan deformasi permanen





ini dicapai dalam masalah kekakuan. Mode kegagalan terakhir adalah keretakan (*cracking*), yaitu keretakan yang seharusnya tidak berpengaruh pada fungsi struktur itu sendiri. Akan tetapi hal ini berperan pada laju korosi, penetrasi asam dan berkurangnya kekuatan tarik struktur.

3. *Fatigue limit states* (FLSs) yaitu kondisi batas kelelahan struktur, berhubungan pada berkurangnya kekuatan struktur karena pengaruh beban berulang. Kondisi batas kelelahan adalah hubungan dari akumulasi kerugian dan akhirnya struktur mengalami kegagalan akibat beban berulang. Hal ini dapat diselidiki dari komponen struktur dapat mengalami kegagalan dibawah pembebanan berulang pada suatu tingkat terendah dari beban ultimate. Mekanisme kegagalan meliputi formasi dan penjaralan retak sampai mengalami kepecahan. Ini berakibat suatu struktur dapat mengalami keruntuhan. Kondisi batas kelelahan terjadi pada komponen baja dan pada penguatan-penguatan dalam konstruksi terutama dalam hal kekuatan tarik. Pengaruh pengelasan terutama pada tahanan kelelahan komponen dan sambungannya. Dalam analisa kelelahan, faktor kritis menjadi hal yang perlu dipertimbangkan yaitu beban magnitude dan frekuensinya.

Kebanyakan notasi ambang keamanan (*safety margin*) berhubungan dengan kondisi batas maksimum (ULSs). Sebagai contoh, suatu mode kegagalan struktur dapat terjadi ketika momen yang disebabkan beban berlebihan diterima sistem dari kapasitas yang diijinkan. Dalam analisa struktur,  $R$  menggambarkan kekuatan (*resistance*) atau kapasitas momen yang diterima sistem dan  $Q$  adalah pengaruh pembebanan (momen total terpakai pada sistem yang direncanakan). Bila





disederhanakan  $R$  adalah penyediaan (ketahanan atau kekuatan sistem) dan  $Q$  adalah permintaan. Suatu fungsi kondisi batas (*limit state function*), didefinisikan untuk mode kegagalan adalah (Andrzej and Kevin, 2000) :

$$G(R, Q) = R - Q \quad (3.1)$$

Kondisi batas, sekelompok batas antara harapan dan bukan harapan kinerja struktur, terjadi pada  $g = 0$ . Jika  $g \geq 0$ , struktur masih aman (*safe*) atau kinerja struktur sesuai yang diharapkan. Jika  $g < 0$ , struktur tidaklah aman (kinerja struktur yang tidak diharapkan). Maka peluang kegagalan,  $P_f$  adalah sama dengan peluang bahwa kinerja struktur yang tidak diharapkan akan terjadi. Fungsi kondisi batas secara matematisnya dapat ditulis sebagai berikut :

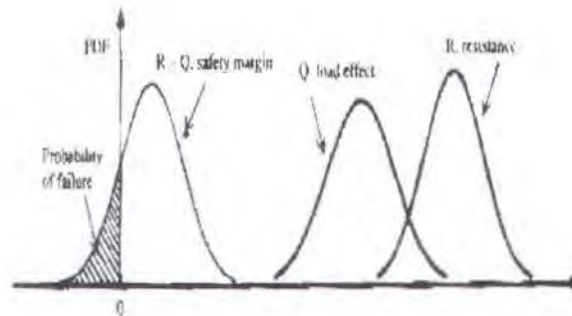
$$P_f = P(R - Q < 0) = P(g < 0) \quad (3.2)$$

$R$  dan  $Q$  adalah variabel acak, yang masing-masing mempunyai fungsi density peluang (*Probability Density Function = PDF*), demikian juga  $Q - R$  merupakan variabel acak yang memiliki PDF seperti yang ditunjukkan gambar III.1. Pada gambar daerah yang diarsir adalah daerah peluang kegagalan. Sehingga, realitas struktur selanjutnya terbagi kedalam dua (2) kategori yaitu, pertama, Kategori aman (*safe*) yaitu pengaruh beban ( $Q$ )  $\leq$  kekuatan ( $R$ ), dan kedua, kategori gagal (*failure*) bila pengaruh beban ( $Q$ )  $>$  kekuatan ( $R$ ).

Keadaan struktur dapat digambarkan dengan menggunakan variasi parameter  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  dimana, parameter pengaruh beban dan kekuatan berupa beban tetap (*dead load*), beban dinamis (*live load*), panjang, lebar, kekuatan tekan, dan momen inertia. Fungsi kondisi batas adalah suatu fungsi  $g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$  dengan parameter beban dan ketahanan adalah :

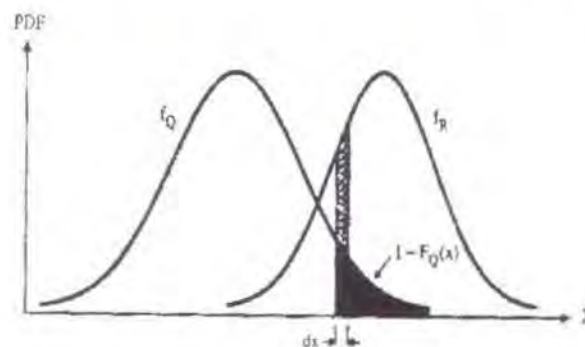


- $g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) > 0$  untuk kondisi struktur yang aman.
- $g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) = 0$  batas antara struktur yang masih aman dan tidak aman.
- $g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) < 0$  kondisi struktur yang mengalami kegagalan.



Gambar III.1. Fungsi density Peluang (PDF), kekuatan (R), dan ambang keamanan

Untuk menentukan peluang kegagalan fungsi kondisi batas yang relatif sederhana dari persamaan (3.1), maka peluang kegagalannya  $P_f$  ditentukan oleh fungsi kerapatan peluang variabel acak R dan Q seperti pada gambar III.2.



Gambar III.2. Fungsi Density peluang Pembebanan ( Q ), dan Kekuatan ( R )

Peluang terjadinya kegagalan ( $P_f$ ) struktur, apabila penyediaan (ketahanan atau kekuatan sistem) tidak dapat memenuhi permintaan (beban yang bekerja pada sistem).



### 3.2.1 Analisa Keandalan Dengan Metoda Weibull

Data percobaan mengindikasikan bahwa variabel acak kontinu menggambarkan kekuatan tarik uniaxial tingkat lanjut plat baja SS 41 adalah tidak simetrik yaitu rata-rata dan bernilai positif. Sifat keluaran menggunakan distribusi normal (sebagaimana lazimnya) dan hasil akhirnya dinalisa dengan menggunakan distribusi Weibull atau distribusi kecondongan simetrik. Tiga parameter fungsi densitas peluang Weibull untuk variabel kekuatan acak kontinu disimbolkan dengan  $\Sigma$ , dan diberikan dalam persamaan (Duffy & Baker, 2001) :

$$f_{\Sigma}(N) = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right) \left(\frac{N-\gamma}{\beta}\right)^{(\alpha-1)} \exp\left[-\left(\frac{N-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha}\right] \quad (3.3)$$

untuk  $N > \gamma$ ,

dan

$$f_{\Sigma}(N) = 0 \quad (3.4)$$

untuk  $N \leq \gamma$ .

Pada persamaan (3.3)  $\alpha$  adalah modulus Weibull (atau parameter bentuk),  $\beta$  adalah parameter skala Weibull, dan  $\gamma$  adalah parameter lokasi (*threshold*).

Distribusi kumulatif Weibull diberikan oleh :

$$F_{\Sigma}(N) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{N-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha}\right] \quad (3.5)$$

untuk  $N > \gamma$ ,

dan

$$F_{\Sigma}(N) = 0 \quad (3.6)$$





untuk  $N \leq \gamma$ .

Jika nilai parameter threshold (lokasi) diambil nol. Dalam komponen desain hal ini menggambarkan asumsi kebiasaan, dan memberikan keleluasaan penggunaan formula dua parameter Weibull. Fungsi densitas peluang Weibull ini adalah :

$$f_{\Sigma}(N) = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right) \left(\frac{N}{\beta}\right)^{(\alpha-1)} \exp\left[-\left(\frac{N}{\beta}\right)^{\alpha}\right] \quad (3.7)$$

untuk  $N > \gamma$ .

$$F_{\Sigma}(N) = 0 \quad (3.8)$$

untuk  $N \leq 0$ .

Sedangkan distribusi kumulatif peluangnya adalah :

$$F_{\Sigma}(N) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{N}{\beta}\right)^{\alpha}\right] \quad (3.9)$$

untuk  $N > \gamma$

$$F_{\Sigma}(N) = 0 \quad (3.10)$$

untuk  $N \leq \gamma$ .

Fungsi keandalan Weibull diberikan oleh persamaan sebagai berikut:

$$R(N) = \exp\left[-\left(\frac{N-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha}\right] \quad (3.11).$$

Sedangkan fungsi laju kegagalan Weibull diberikan sebagai perbandingan fungsi density peluang (persamaan 3.7) dengan fungsi keandalan Weibull (persamaan 3.11), yang diformulasikan sebagai berikut:



$$\lambda(N) = \frac{f(N)}{R(N)} = \frac{\alpha}{\beta} \left( \frac{N-\gamma}{\beta} \right)^{\alpha-1} \quad (3.12)$$

Mean,  $\bar{N}$  dari Weibull diberikan oleh :

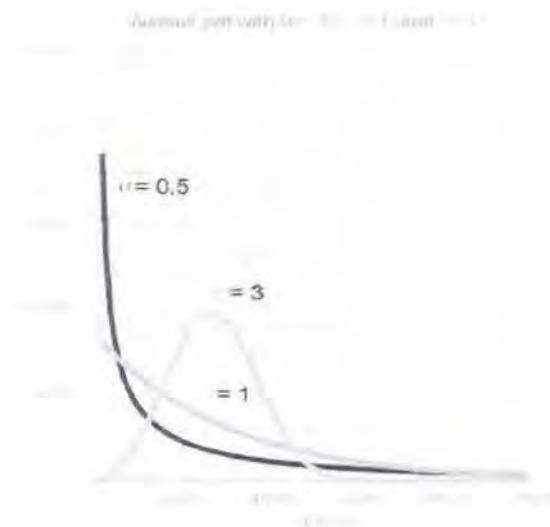
$$\bar{N} = \gamma + \beta \Gamma \left( \frac{1}{\alpha} + 1 \right) \quad (3.13)$$

Penggunaan distribusi Weibull sangat luas dalam analisa data keandalan dan masa kegagalan oleh karena keunggulannya ini. Ketergantungan pada parameter, distribusi dapat digunakan pada variasi model perilaku masa kegagalan. Parameter-parameter ini berpengaruh pada *bentuk kurva fungsi densitas peluang (PDF), keandalan dan laju kegagalan, (Wiley & Sons, 1952).*

*Parameter bentuk Weibull  $\alpha$*  dikenal juga dengan kecondongan / kelandaian, karena nilai parameter ini sama dengan kecondongan pada kurva garis regresi peluang. Perbedaan nilai parameter bentuk dapat ditandai pengaruhnya pada perilaku distribusi. Kenyataannya, beberapa nilai parameter bentuk akan menyebabkan persamaan distribusi berkurang pada distribusi lain. Misalnya, nilai  $\alpha = 1$ , PDF pada tiga parameter Weibull berkurang membentuk distribusi eksponensial. Persamaan menjadi :

$$f_{\Sigma}(N) = \frac{1}{\beta} \exp \left[ - \left( \frac{N-\gamma}{\beta} \right) \right] \quad (3.14)$$

*Pengaruh pada kurva fungsi densitas peluang (PDF) dengan nilai parameter bentuk yang berbeda diberikan pada gambar berikut (www.ReliaSoft.com):*



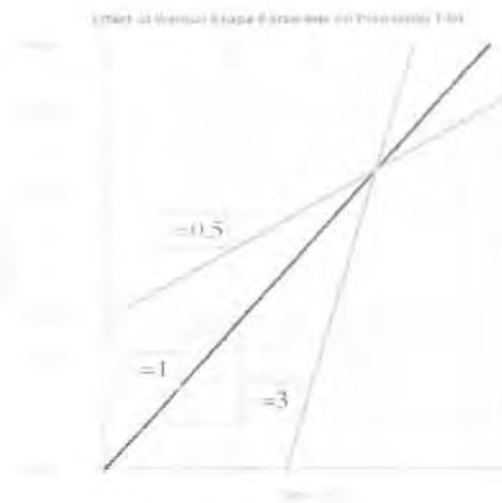
Gambar III.3. Pengaruh parameter bentuk pada kurva PDF

Untuk  $0 < \alpha \leq 1$  diketahui bahwa waktu  $T$  mulai di titik nol, sehingga  $f(T)$  mendekati nilai tak hingga. Bila  $T$  tak hingga, maka  $f(T)$  sama dengan nol.  $f(T)$  berkurang secara monoton dan cenderung cekung sebagai akibat bertambahnya  $T$  melebihi parameter lokasi ( $\gamma$ ). Mode kegagalan ini tidak umum dikenal. Untuk  $\alpha > 1$ , kurva menjadi seperti bentuk distribusi eksponensial, sebagai kasus khusus atau,  $f(T) = 0$  pada  $T = 0$ ,  $f(T)$  bertambah sebagai fungsi  $T$ .

Besar nilai  $\alpha$  relatif terhadap sifat fisik item model, dan menjadi lebih nampak ketika kita melakukan observasi bagaimana perbedaan nilai berpengaruh terhadap fungsi laju kegagalan dan keandalan. Sebuah catatan mengenai hal ini adalah apabila nilai untuk  $\alpha = 0,999$ , maka  $f(0) = \infty$ , akan tetapi bila  $\alpha = 1,001$ , maka  $f(0) = 0$ . Perbedaan yang tajam ini menyulitkan perkiraan peluang maksimum dengan nilai  $\beta$  yang diabaikan salah satunya.

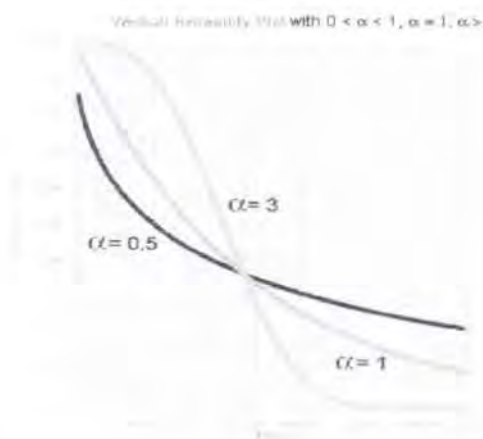
*Pengaruh parameter  $\alpha$  terhadap fungsi distribusi kumulatif (CDF) dan fungsi keandalan ditunjukkan dalam gambar berikut:*





Gambar III.4. Pengaruh  $\alpha$  pada pada kurva CDFs pada kertas gambar peluang Weibull dengan nilai parameter skala ( $\beta$ ) tertentu.

Dalam gambar, pengaruh parameter  $\alpha$  mudah nampak karena parameter ini dikenal juga dengan parameter kecondongan / kelandaian. Diketahui bahwa model ini digambarkan oleh tiga garis yang semuanya memiliki nilai parameter skala yang sama. Sedang pengaruh variasi nilai parameter bentuk ( $\alpha$ ) pada penggambaran keandalan, dimana analog dengan kurva linear peluang ditunjukkan pada gambar berikut :

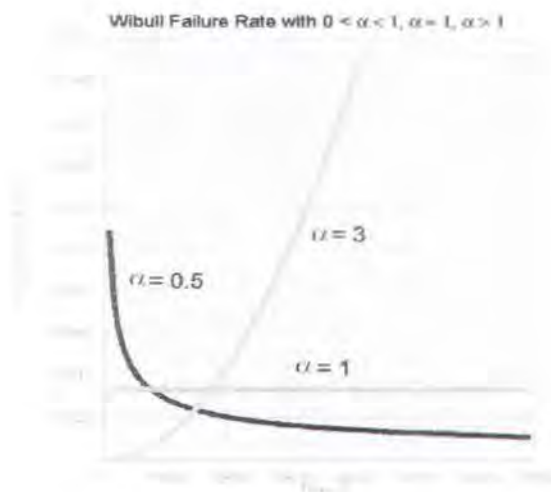


Gambar III.5. Pengaruh nilai  $\alpha$  pada kurva keandalan Weibull.



Pada gambar  $R(T)$  berkurang tajam dan monoton untuk  $0 < \alpha < 1$ , dan kurva cembung. Untuk  $\alpha = 1$ ,  $R(T)$  berkurang monoton tetapi kurang tajam dari pada  $0 < \alpha < 1$ , dan kurva cembung. Untuk  $\alpha > 1$ ,  $R(T)$  berkurang dengan semakin bertambahnya nilai  $T$ .

Nilai  $\alpha$  memiliki sifat yang berpengaruh pada laju kegagalan distribusi Weibull dan berpengaruh pada penggambaran tentang sifat didaerah kegagalan, sehingga menjadi pertimbangan apakah nilai  $\alpha$  kurang dari atau sama dengan atau lebih besar dari pada satu. Indikasi nilai parameter bentuk ini digambarkan dalam gambar berikut:



Gambar III.6. Pengaruh  $\alpha$  terhadap fungsi laju kegagalan Weibull.

Dari gambar, daerah dengan  $\alpha < 1$  diketahui laju keagalannya berkurang terhadap waktu. Daerah dengan  $\alpha = 1$ , laju keagalannya konstan (konsisten dengan distribusi eksponensial). Sedangkan daerah  $\alpha > 1$ , laju kegagalan bertambah terhadap waktu. Maka laju kegagalan untuk  $0 < \alpha < 1$  tak terbatas / terhingga pada  $T = 0$ . Laju kegagalan,  $\lambda(T)$ , berkurang dan kemudian monoton

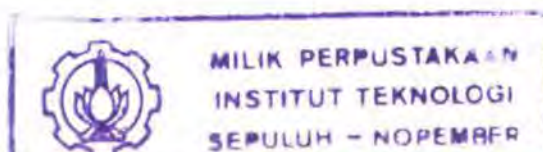


dan kurva adalah cembung (*convex*), mendekati nilai nol sehingga  $T \rightarrow \infty$  atau  $\lambda(T) = 0$ . Sifat ini membuat nilai  $0 < \alpha < 1$  sesuai untuk menggambarkan laju kegagalan tiap tipe unit kegagalan yang muncul lebih awal, yang mana laju kegagalan tipe ini, mengalami penurunan laju kegagalan menurut waktu. Pada waktu menghadapi keadaan semacam ini dalam produk manufaktur, laju kegagalan mengindikasikan adanya masalah dalam proses produksi, tidak standarnya suatu bagian dan komponen struktur atau masalah dengan pengepakan dan pengapalan.

Untuk  $\alpha > 1$ ,  $\lambda(T)$  bertambah sebagai pertambahan  $T$  dan menjadi sesuai untuk menggambarkan laju kegagalan tiap unit tipe kegagalan yang mengalami kerusakan. Untuk  $1 < \alpha < 1$ , maka kurva  $\lambda(T)$  adalah cekung, akibatnya laju kegagalan bertambah sebagai fungsi pertambahan  $T$ .

Untuk  $\alpha = 2$ , ada suatu garis lurus yang menyatakan hubungan antara  $\lambda(T)$  dan  $T$ , dimulai pada nilai  $\lambda(T) = 0$  pada  $T = \gamma$ , dan bertambah kemudian dengan kelandaian  $2 / \gamma^2$ . Akibatnya, laju kegagalan bertambah dengan laju yang konstan sebagai pertambahan fungsi  $T$ . Selanjutnya, jika  $\gamma = 1$  kelandaian menjadi sama dengan 2, dan bila  $\gamma = 0$ ,  $\lambda(T)$  membentuk garis lurus yang melewati titik asal dengan kelandaian sama dengan 2. Dengan demikian apabila  $\alpha > 2$ , maka kurva akan cembung dengan kelandaian yang meningkat sebagai pertambahan  $T$ . Akibatnya, laju kegagalan meningkat sebagai fungsi pertambahan  $T$  dan mengindikasikan waktu sampai mengalami kerusakan.

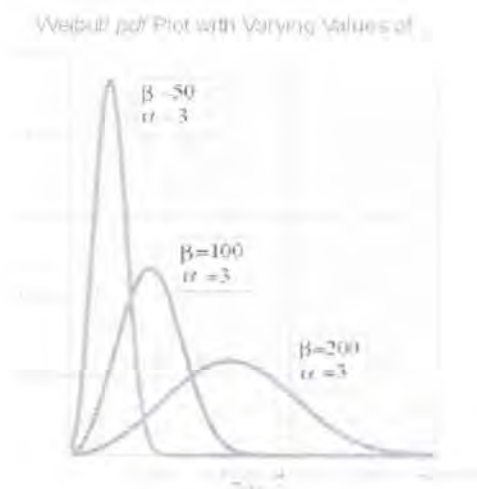
Suatu perubahan dalam *parameter skala* ( $\beta$ ) adalah memiliki pengaruh yang sama terhadap distribusi sebagai perubahan pada skala absis. Bertambahnya nilai







parameter skala  $\beta$  dengan menganggap parameter bentuk ( $\alpha$ ) adalah konstan berdampak pada bidang hasil kurva PDF (*probabilitas distribution function*). Sehingga area dibawah kurva PDF adalah bernilai konstan sama dengan 1 (satu), “puncak” kurva PDF juga akan berkurang akibat  $\beta$  yang bertambah, seperti pada gambar berikut ini:

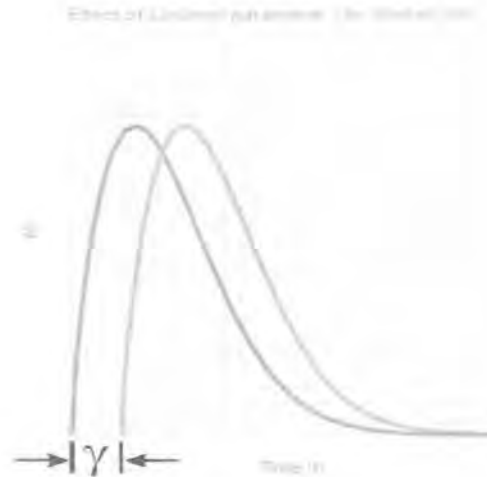


Gambar III.7. Pengaruh  $\beta$  pada PDF Weibull untuk nilai  $\alpha$  yang konstan.

Pada gambar, jika  $\beta$  bertambah, dimana  $\alpha$  dan  $\gamma$  dijaga tetap, distribusi yang diperoleh adalah bidang hasil disebelah kanan dan menurun ketinggiannya, yang mana merupakan hasil dari tetapnya nilai parameter bentuk dan parameter lokasi. Jika parameter skala  $\beta$  berkurang, yang mana parameter bentuk dan parameter lokasi dijaga bernilai sama, distribusi yang diperoleh terdorong kearah kiri (kearah 0 atau  $\gamma$ ), dan kurva mengalami pertambahan ketinggian.  $\beta$  memiliki satuan yang sama dengan  $T$  seperti jam, mil, cycle dan lain-lain.

*Parameter lokasi,  $\gamma$*  sebagai parameter yang menyatakan secara tidak langsung lokasi distribusi sepanjang sumbu absis. Perubahan nilai parameter lokasi akan berpengaruh pada “kemiringan” distribusi dan hal ini merupakan

fungsi dari baik kurva di sebelah kanan ( jika  $\gamma > 0$  ) dan atau kurva disebelah kiri ( jika  $\gamma < 0$  ).



Gambar III.8. Pengaruh parameter lokasi positif  $\gamma$ , pada posisi PDF Weibull.

Apabila  $\gamma = 0$ , permulaan distribusi pada  $T = 0$  atau dimulai dititik asal. Jika  $\gamma > 0$ , distribusi dimulai pada lokasi  $\gamma$  disebelah kanan titik asal. Sedangkan bila  $\gamma < 0$ , distribusi dimulai pada lokasi  $\gamma$  disebelah kiri titik asal. Oleh karena itu,  $\gamma$  memberikan suatu perkiraan awal waktu sampai terjadi kegagalan tiap satuan. Periode waktu 0 sampai positif  $\gamma$  adalah periode pengoperasian tidak gagal tiap satu satuan. Parameter  $\gamma$  diasumsikan bahwa semua nilai memberikan perkiraan awal waktu dimulainya pengujian, penamaan selama proses produksi, masa penyimpanan, perpindahan, selama pemeriksaan sebelumnya untuk memulai suatu inspeksi, atau sebelum pemakaian yang sebenarnya.  $\gamma$  memiliki satuan yang sama dengan waktu  $T$ , seperti dalam satuan jam, mil, cycle, dan lain-lain.



### 3.3. PROSEDUR PERHITUNGAN ANALISA KEANDALAN

Langkah-langkah perhitungan analisa keandalan struktur sambungan las dengan defect (moda kegagalan keretakan di pusat retak dan berbentuk elips, berdasarkan pada metode *fracture mechanics*) dengan distribusi Weibull adalah (Duffy, 2001):

1. Sortir data mentah, yaitu cycle tegangan lelah ( $N_i$ ), dari yang terkecil dan diakhiri yang terbesar.
2. Menghitung peluang ranking  $P_i$  tiap-tiap data mentah.

$$P_i = \frac{i - 0,5}{n} \quad (3.14)$$

3. Hitung variabel bantu  $w_i$  (Margetson & Cooper, 1984) untuk tiap-tiap peluang ranking  $P_i$ :

$$w_i = \ln \left( \frac{1}{1 - P_i} \right) \quad (3.15)$$

4. Hitung parameter  $\beta$

$$\beta = \frac{n \left[ \sum_{i=1}^n N_i (w_i)^{1/\alpha} \right] - \left[ \sum_{i=1}^n N_i \right] \left[ \sum_{i=1}^n (w_i)^{1/\alpha} \right]}{n \sum_{i=1}^n (w_i)^{2/\alpha} - \left[ \sum_{i=1}^n (w_i)^{1/\alpha} \right] \left[ \sum_{i=1}^n w_i \right]} \quad (3.16)$$

5. Hitung parameter  $\gamma$

$$\gamma = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n N_i \right] \left[ \sum_{i=1}^n (w_i)^{2/\alpha} \right] - \left[ \sum_{i=1}^n N_i (w_i)^{1/\alpha} \right] \left[ \sum_{i=1}^n (w_i)^{1/\alpha} \right]}{n \sum_{i=1}^n (w_i)^{2/\alpha} - \left[ \sum_{i=1}^n (w_i)^{1/\alpha} \right] \left[ \sum_{i=1}^n w_i \right]} \quad (3.17)$$





Baik persamaan 3.14 maupun persamaan 3.15 memerlukan parameter  $\alpha$  dan ditentukan mula-mula 1. Hitung  $\beta$  dan  $\gamma$ , jika kurang memuaskan, coba naikan  $\alpha$ , hitung lagi  $\beta$  dan  $\gamma$ . Terus dilakukan iterasi demikian sampai tercapai hasil yang memuaskan.

6. Untuk menghindari kriteria “memuaskan” yang subyektif, teknik *Sum Squared Residual* (SSR), (Duffy et al, 2001) digunakan untuk mengevaluasi setiap pasangan parameter  $\gamma$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ . Hitung cycle tegangan ( $N_i$ ) yang dihubungkan dengan peluang rangking kegagalan ( $P_i$ ), dengan mengasumsikan kondisi tegangan uniaxial dalam spesimen uji dengan persamaan:

$$\bar{N}_i = \gamma + \beta \left[ \ln \left( \frac{1}{1 - P_i} \right) \right]^{1/\alpha} \quad (3.18)$$

7. Residual dinyatakan dengan selisih antara nilai estimasi dengan data mentah  $N_i$  dinyatakan sebagai berikut:

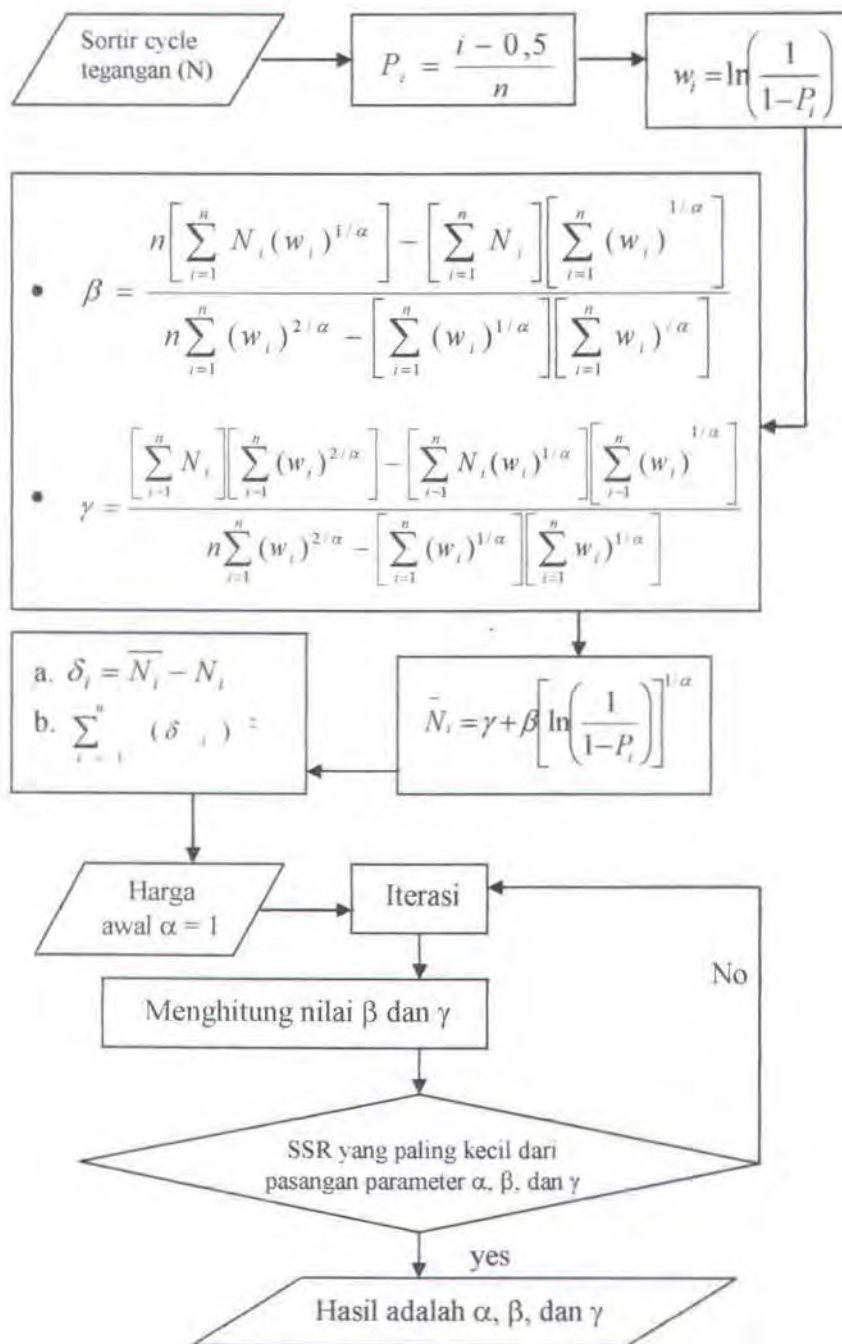
$$\delta_i = \bar{N}_i - N_i \quad (3.19)$$

8. Sum Squared Residual (SSR) dinyatakan sebagai :

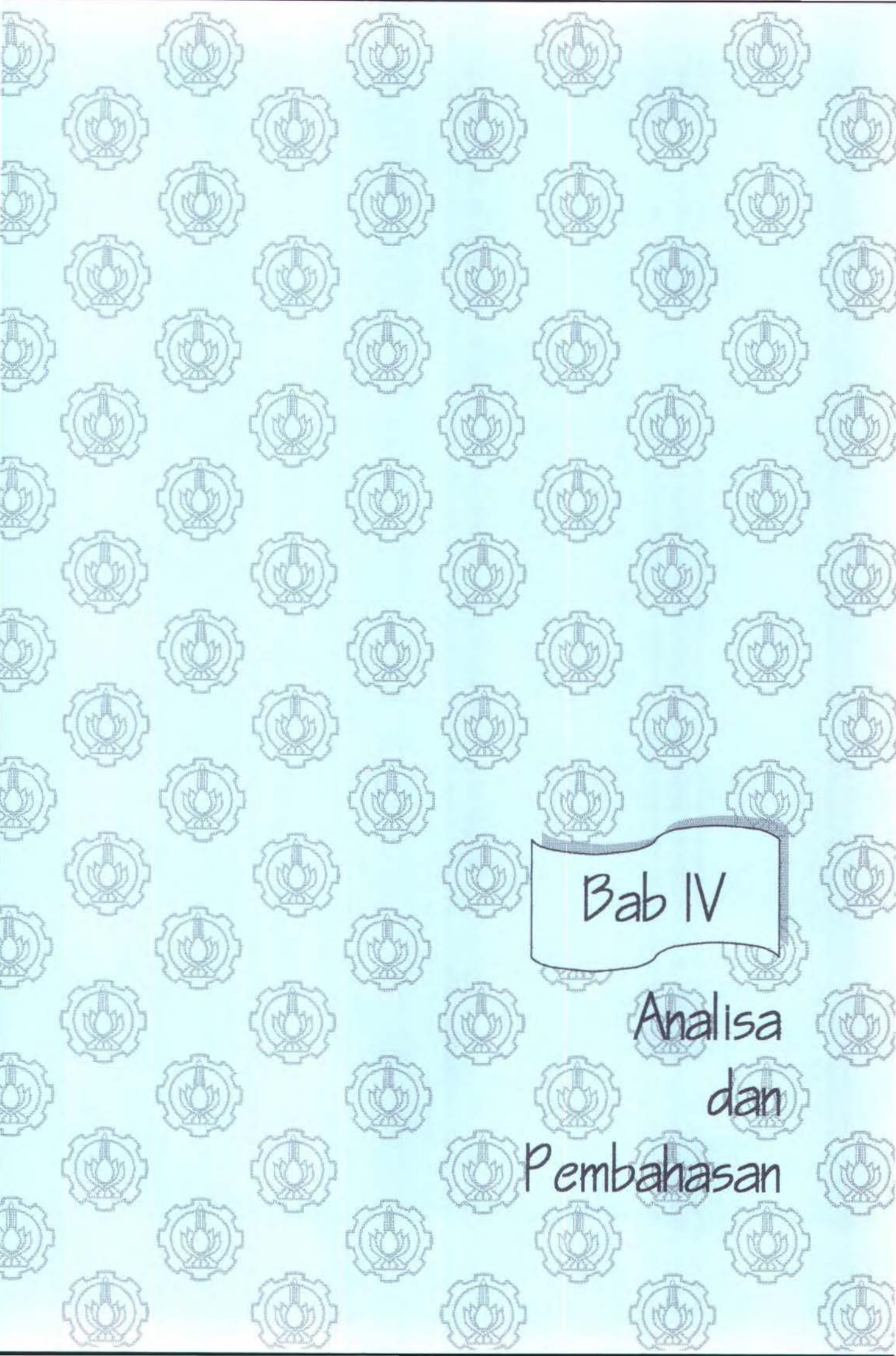
$$\sum_{i=1}^n (\delta_i)^2 = \sum_{i=1}^n (\gamma + \beta (w_i)^{1/\alpha} - N_i)^2 \quad (3.20)$$

9. Kriteria memuaskan bagi pasangan parameter  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$  adalah yang menghasilkan SSR terendah.

Untuk lebih jelasnya, dapat dilihat diagram alir (flowchart) analisa distribusi Weibull pada gambar III.9:



Gambar III.9. Diagram alir analisa Probabilistik dengan distribusi Weibull



## Bab IV

# Analisa dan Pembahasan





## BAB IV

### ANALISA DAN PEMBAHASAN

#### 4.1. HASIL PERHITUNGAN FATIGUE LIFE

Penentuan fatigue life dari spesimen yang mempunyai cacat dalam yang berbentuk elip, dilaksanakan dengan mengintegrasikan perkalian  $C$  dan  $\Delta K^m$  dengan batas-batas panjang retak awal dan retak akhir. Dalam perhitungan ini data diambil dari hasil percobaan kelelahan yang dilakukan di laboratorium konstruksi dan kekuatan FTK-ITS untuk jenis material SS-41. Sedangkan harga koefisien empiris  $m$  dan  $C$  diambil dari percobaan para peneliti untuk jenis material SS-41, adalah:

$$m = 2.8$$

$$C = 1.3E-12$$

Berikut ini adalah langkah-langkah perhitungan fatigue life yang ditulis dalam bahasa pemrograman visual basic sebagai berikut:

1. Penentuan harga faktor koreksi dan range faktor intensitas tegangan.

Dari rumus  $\Delta K$  (pers. 2.10) akan dicari faktor koreksi  $X_o^{(1)}$ ,  $X_o^{(2)}$  dan  $X_o^{(3)}$ .

Faktor koreksi akan mudah ditentukan secara manual berdasarkan grafik, (gambar II.13 – II.15) akan tetapi secara pemrograman tidak bisa dilakukan sehingga harus dirubah terlebih dahulu dalam bentuk persamaan. Dengan menggunakan Metoda Least Square orde 3 dengan dua variabel yaitu  $a / c$  dan  $a / h$  harga-harga faktor koreksi akan mudah diperoleh. Dengan



diketahuinya harga faktor koreksi ini, selanjutnya disubstitusikan kedalam persamaan range intensitas tegangan  $\Delta K$ .

2. Penentuan batas integrasi.

Dari persamaan 2.9 Fatigue life merupakan fungsi  $\Delta K$  terhadap pertambahan lebar retak, dengan batas integrasi mulai dari separuh lebar retak awal sampai dengan separuh lebar retak pada waktu konstruksi mengalami kepecahan. Pada waktu kepecahan terjadi, garis batas terluar dari penjalaran elip dinamakan sebagai border line. Dengan kata lain pengintegrasian dilakukan dari garis elip awal sampai border line yaitu sepanjang  $a_f$  sampai  $a_i$  dengan pertambahan  $da$ . Harga  $da$  minimum ditentukan

$$da_{\min} = \frac{a_f - a_i}{P}, \text{ dilakukan iterasi sampai } P \text{ kali.}$$

3. Pengintegrasian rumus N

Fatigue life (pers. 2.9) dapat diubah menjadi sebagai berikut;

$$\sum N_i = \sum_{i=1}^P \frac{\Delta a}{C(\Delta K_{0i})^m} \quad (4.1)$$

dengan nilai

$$\Delta K_{0i} = \Delta K_{wi} = \Delta \sigma_{eff} \sqrt{\pi a} X_o^{(\infty)} \left[ 1 + (X_o^{(1)} - 1) + (X_o^{(2)} - 1) + (X_o^{(3)} - 1) \right]$$

$$\Delta K_{wi} = \Delta \sigma_{eff} \sqrt{\pi a} X_o^{(\infty)} \left[ 1 + (X_o^{(1)} - 1) + (X_o^{(2)} - 1) + (X_o^{(3)} - 1) \right]$$

Pada kondisi awal ada harga  $a_1$  dan  $c_1$ , sedangkan harga  $h$  dan  $\Delta \sigma_{eff}$  tetap sepanjang pengintegrasian.



$$N_1 = \frac{\Delta a}{C(\Delta K_{01})^m}, \text{ dengan } \Delta a = \frac{a_f - a_i}{P}$$

$$\Delta c_1 = N_1 C (\Delta K_{r1})^m$$

Pada kondisi kedua atau  $i = 2$  harga  $a$  dan  $c$  masing-masing menjadi:

$$a_2 = a_1 + \Delta a$$

$$c_2 = c_1 + \Delta c_1$$

Dengan adanya perubahan harga  $a$  dan  $c$  maka berubah pula harga faktor koreksi demikian juga harga  $\Delta K_0$  dan  $\Delta K_r$  sehingga

$$N_2 = \frac{\Delta a}{C(\Delta K_{02})^m}, \text{ dengan } \Delta a = \frac{a_f - a_i}{P}$$

$$\Delta c_2 = N_2 C (\Delta K_{r2})^m$$

Pada kondisi ketiga atau  $i = 3$  harga  $a$  dan  $c$  masing-masing menjadi

$$a_3 = a_2 + \Delta a$$

$$c_3 = c_2 + \Delta c_2$$

Sehingga

$$N_3 = \frac{\Delta a}{C(\Delta K_{03})^m}, \text{ dengan } \Delta a = \frac{a_f - a_i}{P}$$

$$\Delta c_3 = N_3 C (\Delta K_{r3})^m$$

Demikian seterusnya sampai  $P$  kali. Fatigue life,  $N$ , yang dimaksud adalah jumlah total  $N_1$  sampai  $N_P$ . Hasil perhitungan yang dilakukan adalah sebagai berikut:





Tabel IV.1. Hasil perhitungan fatigue life baja SS-41

Spes.	$\sigma$ (N/mm)	a (mm)	c (mm)	H (mm)	Nexp.	Ncalc.
1.2	167	1,56	5,4	3,46	27732	31758,49
2.1	167	1,64	5,85	3,34	9985	25670,41
2.2	167	1,5	5,62	3,15	27510	27793,72
3.1	167	1,13	3,93	4,43	62000	79396,48
3.3	167	1,58	5,25	4,18	33800	43675,50
3.4	167	1,25	5,13	4,25	50000	61008,64

## 4.2. PENAKSIRAN PARAMETER

Penaksiran pasangan parameter Weibull dilakukan dengan proses iterasi. Iterasi akan mudah dilakukan dengan bantuan komputer, dalam penulisan Tugas Akhir ini digunakan bahasa pemograman visual basic. Dengan mengikuti langkah-langkah yang ditentukan pada BAB III gambar III.9 diperoleh hasil iterasi pasangan parameter Weibull untuk masing-masing spesimen. Terdapat enam pasang parameter Weibull seperti pada tabel IV.4.

Dengan pasangan parameter-parameter ini selanjutnya diperoleh nilai PDF, CDF,  $R(N)$  dan  $\lambda(N)$  menurut Weibull. Data hasil perhitungan fatigue life (N) spesimen baja SS-41 digunakan sebagai data input penentuan parameter-parameter Weibull hasilnya adalah sebagai berikut:

Tabel IV.2. Pasangan Parameter Tiap Spesimen

Spesimen	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
1.2	2,225	22988,448	0
2.1	1,946	19322	330,116
2.2	1,946	20571	227,659
3.1	2,275	56545,263	0
3.3	2,326	32314,024	0
3.4	2,485	47520,41	0



#### 4.3. FUNGSI KEANDALAN WEIBULL

Setelah diketahui nilai – nilai parameter Weibull, maka selanjutnya ditentukan fungsi densitas peluang (PDF), fungsi distribusi (CDF), fungsi reliabilitas  $R(N)$  dan fungsi laju kegagalannya  $\lambda(N)$ . Fungsi densiti peluang didapat dari histogram frekuensi relatif yang dimuluskan sehingga menjadi kurva kontinu. Melalui kurva tersebut kemudian dapat ditentukan persamaan fungsi densiti peluang. Hal ini dapat dilihat dengan jelas pada lampiran B.

Persoalan utama yang menarik untuk dipelajari dengan melibatkan probabilitas terapan pada studi reliabilitas, terutama untuk kepentingan pekiraan umur konstruksi adalah upaya menentukan besar probabilitas terjadi kerusakan pada suatu konstruksi pada siklus tertentu ( $N$ ).

Laju kegagalan adalah besaran yang mengukur kecepatan suatu komponen menjadi rusak per satuan waktu karena komponen tersebut digunakan dalam kondisi tertentu. Besaran ini paling banyak digunakan dalam analisis reliabilitas karena reliabilitas biasanya dinyatakan sebagai fungsi dari laju kerusakan.

Di bawah ini akan diuraikan pemodelan keandalan sambungan las butt-joint baja SS-41 dengan defect. Sebagai berikut:

##### a. Untuk Parameter Weibull Spesimen 1.2.

##### Fungsi Densitas Peluang

$$f(N) = 9,7 \cdot 10^{-5} \left( \frac{N}{22988,448} \right)^{1,225} \exp \left\{ - \left( \frac{N}{22988,448} \right)^{2,225} \right\}$$

##### Fungsi Distribusi Kumulatif



$$F(N) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{N}{22988,448}\right)^{2,225}\right\}$$

### Fungsi Keandalan

$$R(N) = \exp\left\{-\left(\frac{N}{22988,448}\right)^{2,225}\right\}$$

### Fungsi Laju Kegagalan

$$\lambda(t) = 9,7 \cdot 10^{-5} \left(\frac{N}{22988,448}\right)^{1,225}$$

Nilai rata-rata antar waktu kerusakan spesimen dihitung dengan menggunakan persamaan 3.13, diperoleh (Nilai Fungsi  $\Gamma(k)$  diperoleh pada lampiran C)

$$MTBF = 22988,448 \Gamma\left(1 + \frac{1}{2,225}\right) = 20359,9489 \text{ cycle}$$

Pada tabel IV.3. dapat digambarkan bahwa probabilitas konstruksi akan tetap baik pada siklus pembebanan  $2 \cdot 10^4$  cycle, dengan reliability sebesar 48,0%. Hal ini berarti konstruksi tersebut akan rusak apabila mencapai cycle pembebanan lebih dari  $2 \cdot 10^4$  cycle, karena reliability-nya kurang dari 50%. Reliability mencapai 50% pada saat konstruksi mengalami cycle pembebanan  $1,007 \cdot 10^4$  cycle, dengan laju kegagalan sebesar  $3,53 \cdot 10^{-4}$ . Nilai ini diperoleh dari:

$$R(N) = \exp\left\{-\left(\frac{N}{22988,448}\right)^{2,225}\right\}$$

$$\ln(0,5) = \exp\left\{-\left(\frac{N}{22988,448}\right)^{2,225}\right\}$$







$$-0.693 = -\left(\frac{N}{22988,448}\right)^{2,225} \Rightarrow (0,693)^{1/2,225} = \left(\frac{N}{22988,448}\right)$$

$$N = 19530,997 \approx 1,95 \cdot 10^4 \text{ cycle}$$

Berikut adalah hasil perhitungan reliability dan laju kegagalan untuk beberapa nilai N.

Tabel IV.3. Reliability dan Laju Kegagalan Spesimen 1.2

N	R(N)	$\lambda(N)$	N	R(N)	$\lambda(N)$
2000	0,996	4,86E-06	19000	0,520	7,66E-05
3000	0,989	7,99E-06	<b>20000</b>	<b>0,480</b>	<b>8,16E-05</b>
4000	0,980	1,14E-05	21000	0,441	8,66E-05
5000	0,967	1,49E-05	22000	0,404	9,17E-05
6000	0,951	1,87E-05	23000	0,367	9,68E-05
7000	0,932	2,26E-05	24000	0,333	1,02E-04
8000	0,909	2,66E-05	25000	0,300	1,07E-04
9000	0,883	3,07E-05	26000	0,268	1,13E-04
10000	0,855	3,49E-05	27000	0,239	1,18E-04
11000	0,824	3,92E-05	28000	0,212	1,23E-04
12000	0,790	4,36E-05	29000	0,187	1,29E-04
13000	0,755	4,81E-05	30000	0,164	1,34E-04
14000	0,718	5,27E-05	31000	0,143	1,40E-04
15000	0,679	5,74E-05	32000	0,124	1,45E-04
16000	0,640	6,21E-05	33000	0,107	1,51E-04
17000	0,600	6,69E-05	34000	0,092	1,56E-04
18000	0,560	7,17E-05			

b. Untuk Parameter Weibull Spesimen 2.1.

Fungsi Densitas Peluang

$$f(N) = 1,0 \cdot 10^{-4} \left(\frac{N - 330,116}{19322}\right)^{0,946} \exp\left\{-\left(\frac{N - 330,116}{19322}\right)^{2,946}\right\}$$

Fungsi Distribusi Kumulatif

$$F(N) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{N - 330,116}{19322}\right)^{2,946}\right\}$$

Fungsi Keandalan



$$R(N) = \exp \left\{ - \left( \frac{N - 330,116}{19322} \right)^{1,946} \right\}$$

#### Fungsi Laju Kegagalan

$$\lambda(t) = 1,0 \cdot 10^{-4} \left( \frac{N - 330,116}{19322} \right)^{0,946}$$

Nilai rata-rata antar waktu kerusakan spesimen adalah:

$$MTBF = 330,116 + 19322 \Gamma \left( 1 + \frac{1}{1,946} \right) = 17461 \text{ cycle}$$

Tabel IV.4. Reliability dan Laju Kegagalan Spesimen 2.1

N	R(N)	$\lambda(N)$
2000	0.992	9.9E-06
4000	0.961	2.1E-05
6000	0.912	3.2E-05
8000	0.847	4.2E-05
10000	0.771	5.2E-05
12000	0.687	6.3E-05
14000	0.601	7.3E-05
16000	0.514	8.3E-05
18000	0.432	9.3E-05
20000	0.355	1.0E-04
22000	0.286	1.1E-04
24000	0.227	1.2E-04
26000	0.176	1.3E-04
28000	0.134	1.4E-04
30000	0.100	1.5E-04

Pada tabel IV.4. dapat digambarkan bahwa probabilitas spesimen untuk tetap baik setelah mengalami siklus pembebanan  $1,7 \cdot 10^4$  cycle, dengan reliability (keandalan) sebesar 47,2%. Hal ini berarti konstruksi tersebut akan rusak apabila mencapai cycle pembebanan lebih dari  $1,7 \cdot 10^4$  cycle, karena reliability-nya kurang dari 50%. Reliability mencapai 50% pada saat konstruksi mengalami cycle pembebanan  $1,63 \cdot 10^4$  cycle, dengan laju kegagalan sebesar



$8,40 \cdot 10^{-5}$ . Laju kegagalan ini akan meningkat seiring bertambahnya siklus pembebanan.

**c. Untuk Parameter Weibull 2.2.**

**Fungsi Densitas Peluang**

$$f(N) = 9,5 \cdot 10^{-5} \left( \frac{N - 227,659}{20571} \right)^{0,946} \exp \left\{ - \left( \frac{N - 227,659}{20571} \right)^{1,946} \right\}$$

**Fungsi Distribusi Kumulatif**

$$F(N) = 1 - \exp \left\{ - \left( \frac{N - 227,659}{20571} \right)^{1,946} \right\}$$

**Fungsi Keandalan**

$$R(N) = \exp \left\{ - \left( \frac{N - 227,659}{20571} \right)^{1,946} \right\}$$

**Fungsi Laju Kegagalan**

$$\lambda(t) = 9,5 \cdot 10^{-5} \left( \frac{N - 227,659}{20571} \right)^{0,946}$$

Nilai rata-rata antar waktu kerusakan spesimen adalah:

$$MTBF = 227,659 + 20571 \Gamma \left( 1 + \frac{1}{1,946} \right) = 18466 \text{ cycle}$$

Pada tabel IV.5, dapat diinterpretasikan bahwa probabilitas konstruksi untuk tetap baik yaitu pada cycle mencapai  $1,8 \cdot 10^4$  dengan tingkat keandalan 47,1%. Hal ini berarti juga bahwa cycle lebih dari  $1,8 \cdot 10^4$  sudah tidak dapat dipakai karena keandalannya kurang dari 50%. Reliability 50% dicapai pada cycle  $1,73 \cdot 10^4$ , dengan laju kegagalan sebesar  $7,90 \cdot 10^{-5}$ . Laju kegagalan ini akan





meningkat seiring bertambahnya cycle pembebanan. Diberikan juga hasil perhitungan untuk beberapa cycle N yang berbeda seperti pada tabel dibawah ini:

Tabel IV.5. Reliability dan Laju Kegagalan Spesimen 2.2

N	R(N)	$\lambda(N)$
2000	0.992	9.3E-06
4000	0.964	1.9E-05
6000	0.919	2.8E-05
8000	0.860	3.8E-05
10000	0.791	4.7E-05
12000	0.714	5.6E-05
14000	0.633	6.5E-05
16000	0.551	7.4E-05
18000	0.471	8.2E-05
20000	0.396	9.1E-05
22000	0.327	1.0E-04
24000	0.266	1.1E-04
26000	0.212	1.2E-04
28000	0.166	1.3E-04
30000	0.128	1.3E-04
32000	0.097	1.4E-04

**c. Untuk Parameter Weibull Spesimen 3.1**

**Fungsi Densitas Peluang**

$$f(N) = 4,0 \cdot 10^{-5} \left( \frac{N}{56545,263} \right)^{1,275} \exp \left\{ - \left( \frac{N}{56545,263} \right)^{2,275} \right\}$$

**Fungsi Distribusi Kumulatif**

$$F(N) = 1 - \exp \left\{ - \left( \frac{N}{56545,263} \right)^{2,275} \right\}$$

**Fungsi Keandalan**

$$R(N) = \exp \left\{ - \left( \frac{N}{56545,263} \right)^{2,275} \right\}$$

**Fungsi Laju Kegagalan**



$$\lambda(t) = 1 \cdot 10^{-5} \left( \frac{N}{56545,263} \right)^{1,275}$$

Nilai rata-rata antar waktu kerusakan spesimen adalah:

$$MTBF = 56545,263 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{2,275}\right) = 50088,359 \text{ cycle}$$

Tabel IV.6. Reliability dan Laju Kegagalan Spesimen 3.1

N	R(N)	$\lambda(N)$	N	R(N)	$\lambda(N)$
2000	1,000	5,7E-07	42000	0,601	2,8E-05
4000	0,998	1,4E-06	44000	0,568	2,9E-05
6000	0,994	2,3E-06	46000	0,535	3,1E-05
8000	0,988	3,3E-06	48000	0,502	3,3E-05
10000	0,981	4,4E-06	<b>50000</b>	<b>0,470</b>	<b>3,4E-05</b>
12000	0,971	5,6E-06	52000	0,438	3,6E-05
14000	0,959	6,8E-06	54000	0,406	3,8E-05
16000	0,945	8,0E-06	56000	0,376	4,0E-05
18000	0,929	9,3E-06	58000	0,347	4,2E-05
20000	0,910	1,1E-05	60000	0,318	4,3E-05
22000	0,890	1,2E-05	62000	0,291	4,5E-05
24000	0,867	1,3E-05	64000	0,266	4,7E-05
26000	0,843	1,5E-05	66000	0,241	4,9E-05
28000	0,817	1,6E-05	68000	0,218	5,1E-05
30000	0,789	1,8E-05	70000	0,197	5,3E-05
32000	0,760	1,9E-05	72000	0,177	5,5E-05
34000	0,730	2,1E-05	74000	0,158	5,7E-05
36000	0,699	2,3E-05	76000	0,141	5,9E-05
38000	0,667	2,4E-05	78000	0,125	6,1E-05
40000	0,634	2,6E-05	80000	0,111	6,3E-05

Tabel IV.6. menunjukan perhitungan untuk spesimen 3.1. yang akan tetap baik jika mendapat siklus pembebanan sebesar  $5 \cdot 10^4$  cycle dengan tingkat keandalan sebesar 47,0%. Spesimen ini mencapai keandalan 50% apabila cycle beban yang diterimanya sebesar  $4,81 \cdot 10^4$ , dengan laju kegagalan adalah  $3,28 \cdot 10^{-5}$ . Laju kegagalan akan terus meningkat dengan bertambahnya cycle pembebanan.



**d. Untuk Parameter Weibull Spesimen 3.3**

**Fungsi Densitas Peluang**

$$f(N) = 7,2 \cdot 10^{-5} \left( \frac{N}{32314,024} \right)^{1,326} \exp \left\{ - \left( \frac{N}{32314,024} \right)^{2,326} \right\}$$

**Fungsi Distribusi Kumulatif**

$$F(N) = 1 - \exp \left\{ - \left( \frac{N}{32314,024} \right)^{2,326} \right\}$$

**Fungsi Keandalan**

$$R(N) = \exp \left\{ - \left( \frac{N}{32314,024} \right)^{2,326} \right\}$$

**Fungsi Laju Kegagalan**

$$\lambda(t) = 7,2 \cdot 10^{-5} \left( \frac{N}{32314,024} \right)^{1,326}$$

Nilai rata-rata antar waktu kerusakan spesimen adalah:

$$MTBF = 32314,024 \Gamma \left( 1 + \frac{1}{2,326} \right) = 28631,518 \text{ cycle}$$

Dengan variasi nilai fatigue life untuk spesimen 3.3 seperti tabel IV.7. diketahui bahwa spesimen akan tetap baik pada siklus sekitar  $2,8 \cdot 10^4$  dengan tingkat keandalan adalah 48,8% sedangkan laju keagalannya  $6,0 \cdot 10^{-5}$ . Tingkat keandalan sebesar 50% dicapai pada siklus  $2,76 \cdot 10^4$ , dan laju kegagalan adalah  $5,84 \cdot 10^{-5}$ . Dengan bertambahnya fatigue life maka laju kegagalan akan bertambah besar.

Berikut adalah hasil hitungan keandalan dan laju kegagalan spesimen 3.3 untuk beberapa nilai N yang berbeda:





Tabel IV.7. Reliability dan Laju Kegagalan Spesimen 3.3

N	R(N)	$\lambda(N)$	N	R(N)	$\lambda(N)$
2000	0,998	1,8E-06	25000	0,577	5,1E-05
3000	0,996	3,1E-06	26000	0,547	5,4E-05
4000	0,992	4,5E-06	27000	0,518	5,7E-05
5000	0,987	6,1E-06	<b>28000</b>	<b>0,488</b>	<b>6,0E-05</b>
6000	0,980	7,7E-06	29000	0,460	6,2E-05
7000	0,972	9,5E-06	30000	0,431	6,5E-05
8000	0,962	1,1E-05	31000	0,403	6,8E-05
9000	0,950	1,3E-05	32000	0,376	7,1E-05
10000	0,937	1,5E-05	33000	0,350	7,4E-05
11000	0,922	1,7E-05	34000	0,324	7,7E-05
12000	0,905	1,9E-05	35000	0,300	8,0E-05
13000	0,887	2,2E-05	36000	0,276	8,3E-05
14000	0,867	2,4E-05	37000	0,254	8,6E-05
15000	0,846	2,6E-05	38000	0,233	8,9E-05
16000	0,823	2,8E-05	39000	0,213	9,2E-05
17000	0,799	3,1E-05	40000	0,193	9,6E-05
18000	0,774	3,3E-05	41000	0,176	9,9E-05
19000	0,748	3,6E-05	42000	0,159	1,0E-04
20000	0,721	3,8E-05	43000	0,143	1,1E-04
21000	0,693	4,1E-05	44000	0,129	1,1E-04
22000	0,664	4,3E-05	45000	0,115	1,1E-04
23000	0,635	4,6E-05	46000	0,103	1,1E-04
24000	0,606	4,9E-05			

e. Untuk Parameter Weibull Spesimen 3.4

Fungsi Densitas Peluang

$$f(N) = 5,2 \cdot 10^{-5} \left( \frac{N}{47520,41} \right)^{1,485} \exp \left\{ - \left( \frac{N}{47520,41} \right)^{2,485} \right\}$$

Fungsi Distribusi Kumulatif

$$F(N) = 1 - \exp \left\{ - \left( \frac{N}{47520,41} \right)^{2,485} \right\}$$

Fungsi Keandalan

$$R(N) = \exp \left\{ - \left( \frac{N}{47520,41} \right)^{2,485} \right\}$$



### Fungsi Laju Kegagalan

$$\lambda(t) = 5,2 \cdot 10^{-5} \left( \frac{N}{47520,41} \right)^{1,485}$$

Nilai rata-rata antar waktu kerusakan spesimen adalah:

$$MTBF = 47520,41 \cdot \Gamma \left( 1 + \frac{1}{2,485} \right) = 42162,959 \text{ cycle}$$

Tabel IV.8. Reliability dan Laju Kegagalan Spesimen 3.4.

N	R(N)	$\lambda(N)$	N	R(N)	$\lambda(N)$
2000	1,000	4,7E-07	34000	0,647	3,2E-05
3000	0,999	8,6E-07	35000	0,626	3,3E-05
4000	0,998	1,3E-06	36000	0,606	3,5E-05
5000	0,996	1,8E-06	37000	0,585	3,6E-05
6000	0,994	2,4E-06	38000	0,563	3,8E-05
7000	0,991	3,0E-06	39000	0,542	3,9E-05
8000	0,988	3,7E-06	40000	0,521	4,0E-05
9000	0,984	4,4E-06	41000	0,500	4,2E-05
10000	0,979	5,2E-06	<b>42000</b>	<b>0,479</b>	<b>4,4E-05</b>
11000	0,974	6,0E-06	43000	0,458	4,5E-05
12000	0,968	6,8E-06	44000	0,438	4,7E-05
13000	0,961	7,6E-06	45000	0,418	4,8E-05
14000	0,953	8,5E-06	46000	0,398	5,0E-05
15000	0,945	9,4E-06	47000	0,378	5,1E-05
16000	0,935	1,0E-05	48000	0,359	5,3E-05
17000	0,925	1,1E-05	49000	0,340	5,5E-05
18000	0,914	1,2E-05	50000	0,322	5,6E-05
19000	0,903	1,3E-05	51000	0,304	5,8E-05
20000	0,890	1,4E-05	52000	0,286	6,0E-05
21000	0,877	1,6E-05	53000	0,269	6,1E-05
22000	0,863	1,7E-05	54000	0,253	6,3E-05
23000	0,848	1,8E-05	55000	0,237	6,5E-05
24000	0,833	1,9E-05	56000	0,222	6,7E-05
25000	0,817	2,0E-05	57000	0,208	6,9E-05
26000	0,800	2,1E-05	58000	0,194	7,0E-05
27000	0,782	2,3E-05	59000	0,180	7,2E-05
28000	0,764	2,4E-05	60000	0,168	7,4E-05
29000	0,746	2,5E-05	61000	0,156	7,6E-05
30000	0,727	2,6E-05	62000	0,144	7,8E-05
31000	0,708	2,8E-05	63000	0,133	7,9E-05
32000	0,688	2,9E-05	64000	0,123	8,1E-05
33000	0,668	3,0E-05			



Tabel IV.8. menunjukan bahwa spesimen 3.4. akan tetap baik pada siklus pembebanan  $4,2 \cdot 10^4$  cycle dan pada kondisi ini laju kegagalannya adalah  $4,4 \cdot 10^{-5}$ . Tingkat kehandalan 50% yang dicapai spesimen adalah pada siklus  $4,1 \cdot 10^4$  dengan besar laju kegagalan adalah  $4,2 \cdot 10^{-5}$ . Dengan bertambahnya umur fatigue life maka laju kegagalan akan semakin besar pula.


Grafik hubungan keandalan konstruksi dan cycle beban untuk tiap spesimen diberikan pada lampiran B. Pada grafik hasil hitungan keandalan ini diketahui bahwa keandalan akan makin menurun dengan makin besarnya umur fatigue life. Pertambahan nilai fatigue life ini juga menyebabkan makin bertambahnya nilai laju kegagalan. Seperti pada grafik hubungan laju kegagalan terhadap fatigue life (N) yang diberikan pada lampiran B.

#### **4.4. GRAFIK HUBUNGAN RANGE INTENSITAS TEGANGAN TERHADAP FATIGUE LIFE**

Dari perhitungan range intensitas tegangan ( $\Delta K$ ) dan fatigue life (N) diatas selanjutnya harga-harga tersebut dapat digambarkan hubungan keduanya dalam grafik seperti pada lampiran A

Dari grafik tersebut diperoleh informasi bahwa semakin besar geometri cacat maka akan makin kecil umur fatigue lifenya (N) sehingga nilai SIF akan besar. Sesuai dengan analisa perambatan retak menurut Parish formula bahwa kecepatan laju rambat retak sebanding dengan  $\Delta K$  sesuai persamaan 2.9.





## Bab V

### Kesimpulan dan Saran



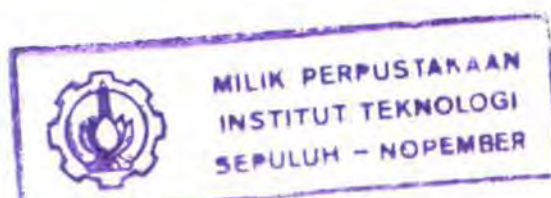
## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisa yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Model keandalan sambungan Butt-Joint Baja SS 41 untuk spesimen 1.2; 2.1; 2.2; 3.1; 3.3; dan 3.4. dengan metoda Weibull diperoleh bahwa rata-rata waktu kegagalan spesimen yang paling tinggi pada spesimen 3.1, sedangkan yang paling rendah pada spesimen 2.1. Hal ini berarti bahwa spesimen 2.1 mempunyai *fatigue life* yang lebih pendek dibandingkan lainnya, sehingga membutuhkan perawatan yang lebih utama. Berdasarkan laju kerusakan, spesimen 3.1 mempunyai  $da/dN$  yang lebih rendah dibandingkan dengan lainnya. Secara berturut-turut rata-rata antar siklus kegagalan paling besar adalah spesimen 3.1; 3.4; 3.3; 1.2; 2.2; dan 2.1 yang masing – masing memiliki keandalan sebesar 47,0%; 47,9%; 48,8%; 48,0%; 47,1%; dan 43,2%.
2. Berdasarkan ukuran retak paling kecil berturut-turut adalah spesimen 3.1; 3.4; 3.3; 1.2; 2.2; dan 2.1, ternyata memberikan nilai faktor intensitas tegangan  $\Delta K$  yang kecil sesuai dengan persamaan SIF sendiri yang berbanding lurus dengan ukuran retak separuh lebar  $a$  dan berbanding terbalik dengan setengah panjang  $c$ . Sehingga *fatigue life* akan besar dan hal ini pun sesuai dengan perhitungan keandalan Weibull.







3. Dengan pemograman ini juga *user / pengguna* lebih mudah menganalisa variasi retak lelah bentuk elips lain untuk jenis material tertentu.
4. Dengan input variasi retak ini juga *user* akan mengetahui umur kelelahan struktur untuk jenis material lainnya.

## 5.2 SARAN

Guna menyempurnakan dan menambah hasil yang dapat memberikan gambaran lebih jelas tentang analisa keandalan umur kelelahan yang dialami material sambungan Butt-Joint baja SS 41 yang mengalami cacat dalam pengelasan, saran yang dapat diberikan penulis untuk penelitian selanjutnya adalah dalam penyusunan model keandalan dapat digunakan fungsi - fungsi distribusi lain yang sesuai.



Daftar  
pustaka





## DAFTAR PUSTAKA

- Annual Book of ASTM Standards*, Philadelphia, 1986.
- Almar, Naess, A. ed., *Fatigue Handbook*, Offshore Steel Structures, Tapir Publishers, Trondheim, Norway, 1985.
- Broek, David, *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, Martinus Nijhoff, Bolton, 1982.
- Broek, David, *The Practical Use of Fracture Mechanics*, FractuREsearch Inc., Galena, OH, USA, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London, 1988.
- Buletin Marine Engineer*, edisi XXII, ImarE (Ikatan Marine Engineer), Jakarta, februari, 2003.
- Duffy, Stephen F., Ph. D., PE. & Baker, Eric H., [www. crtechnologies. Com/engDiv/mechanics/Weibull/theory/appendix.pdf](http://www.crtechnologies.com/engDiv/mechanics/Weibull/theory/appendix.pdf).
- Duffy, Stephen F., Ph. D., PE. & Baker, Eric H., *Weibull Parameter Estimation Theory and Background Information*, Connecticut Reserve Technologies, LLC., Cleveland, Ohio 44114, 2001.
- Halad, A., *Statistical Theory with Engineering Applications*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 783 pp., 1952
- Hellan, K., *Introduction of Fracture Mechanics*, Mcgraw Hill, New York, 1985.
- Moeljanto, H. S., *Perhitungan Fatigue Life Pada Sambungan Las Yang Mempunyai Cacat Dalam Berbentuk Elips Menurut Paris Formula Dengan Menggunakan Bahasa Basic*, Tugas Akhir II, Surabaya, 1986.





- Nowak, Andrzej S., & Collins, Kevin R., *Realibility of Structures*, McGraw-Hill Higher Education, Singapore, 2000.
- Provan, J.W., *Probabilistik Fracture Mechanics and Reliability*, Martinus Nijhoff Publishers, P.O. Box 163, 3300 AD Dordrecht, Netherlands, 1987.
- Schueller, G.I., Shinozuka, M., & Yao, J.T.P., *Structur Safety & Realibility*, Vol. I, A.A. Balkema / Rotterdam / Brookfield, 1994.
- Siswosuwarno, Mardjono, Dr. Ir. & Putra, Setya Ichsan, Ir, *Penerapan Fracture Mechanics Pada Prediksi Umur Kelelahan*, Lab. Aerodinamika PAU-Ilmu Rekayasa, ITB, Bandung, 1987.
- Soeweify, *Perkiraan Fatigue Life dari Sambungan Las yang Mempunyai Cacat dalam Berbentuk Elips*, Seminar Pengembangan Teknologi Pengelasan FT. Kelautan ITS, Surabaya, 1985.



# LAMPIRAN

A

program

perhitungan

fatigue

life



## PROGRAM PERHITUNGAN FATIGUE LIFE FORM FATIGUE LIFE

```
Dim cellRow As Long, cellCol As Long
Private Sub Form_Load()
    Dim i As Long
    fgrid.Rows = 2
    fgrid.Cols = 5
    fgrid.FixedRows = 1
    fgrid.FixedCols = 0
    fgrid.TextMatrix(0, 0) = "Nama Spesimen"
    fgrid.TextMatrix(0, 1) = "a (mm)"
    fgrid.TextMatrix(0, 2) = "c (mm)"
    fgrid.TextMatrix(0, 3) = "h (mm)"
    fgrid.TextMatrix(0, 4) = "NCalc (cycle)"
    For i = 0 To 4
        fgrid.ColAlignmentFixed(i) = flexAlignCenterCenter
        fgrid.ColWidth(i) = TextWidth(fgrid.TextMatrix(0, i)) + 400
        If i = 0 Then
            fgrid.ColAlignment(i) = flexAlignLeftCenter
        Else
            fgrid.ColAlignment(i) = flexAlignRightCenter
        End If
    Next
End Sub

Sub ShowCellEditor()
    With fgrid
        ' Cancel range selection, if any.
        .RowSel = .Row
        .ColSel = .Col
        ' Move the cell editor into place by making it one pixel smaller
        ' than the current cell.
        txtCellEditor.Move .Left + .CellLeft, .Top + .CellTop, _
            .CellWidth - ScaleX(1, vbPixels, vbTwips), _
            .CellHeight - ScaleY(1, vbPixels, vbTwips)
        ' Transfer the contents of the current cell into the TextBox.
        txtCellEditor.Text = .Text
        ' Move the TextBox in front of the grid.
        txtCellEditor.Visible = True
        txtCellEditor.ZOrder
        txtCellEditor.SetFocus
        ' Remember current coordinates for later.
        cellRow = .Row
        cellCol = .Col
    End With
```





```
End Sub
Sub HideCellEditor(Optional Cancel As Boolean)
    ' Hide the TextBox control if necessary.
    If txtCellEditor.Visible Then
        ' If the operation hasn't been canceled, transfer the contents
        ' of the TextBox into the cell that was active.
        If Not Cancel Then
            fgrid.TextMatrix(cellRow, cellCol) = txtCellEditor.Text
        End If
        txtCellEditor.Visible = False
        fgrid.SetFocus
    End If
End Sub

Private Sub fgrid_DblClick()
    If fgrid.Col < 4 Then
        ShowCellEditor
    End If
End Sub

Private Sub fgrid_KeyPress(KeyAscii As Integer)
    If fgrid.Col < 4 Then
        ShowCellEditor
        ' If it's an alphanumeric key, it is passed to the TextBox.
        If KeyAscii >= 32 Then
            txtCellEditor.Text = Chr$(KeyAscii)
            txtCellEditor.SelStart = 1
        End If
    End If
End Sub

Private Sub txtCellEditor_LostFocus()
    HideCellEditor
End Sub

Private Sub txtCellEditor_KeyPress(KeyAscii As Integer)
    Select Case KeyAscii
        Case 13
            HideCellEditor
        Case 27
            HideCellEditor True ' Also cancel the edit.
    End Select
End Sub
```





```
Private Sub btnAddSpec_Click()
    fgrid.Rows = fgrid.Rows + 1
End Sub

Private Sub btnDelSpec_Click()
    Dim i As Long, j As Long
    If fgrid.Row > 0 Then
        If fgrid.Rows = 2 Then
            For j = 0 To fgrid.Cols - 1
                fgrid.TextMatrix(fgrid.Row, j) = ""
            Next
        ElseIf fgrid.Rows > 2 Then
            If fgrid.Row < fgrid.Rows Then
                For i = fgrid.Row To fgrid.Rows - 2
                    For j = 0 To fgrid.Cols - 1
                        fgrid.TextMatrix(i, j) = fgrid.TextMatrix(i + 1, j)
                    Next
                Next
            ElseIf fgrid.Row = fgrid.Rows - 1 Then
                For j = 0 To fgrid.Cols - 1
                    fgrid.TextMatrix(fgrid.Row, j) = ""
                Next
            End If
            fgrid.Rows = fgrid.Rows - 1
        End If
    End If
End Sub

Private Function CheckValid() As Boolean
    Dim isValid As Boolean, i As Long
    isValid = (Text1(0).Text <> "") And (Text1(1).Text <> "") And _
        (Text1(2).Text <> "") And (Text1(6).Text <> "")
    For i = 1 To fgrid.Rows - 1
        isValid = isValid And (fgrid.TextMatrix(i, 0) <> "") And _
            (fgrid.TextMatrix(i, 1) <> "") And (fgrid.TextMatrix(i, 2) <> "") And _
            (fgrid.TextMatrix(i, 3) <> "")
    Next
    CheckValid = isValid
End Function

Private Sub btnHitung_Click()
    Dim i As Long
    If Not CheckValid Then
        MsgBox "Semua input harus terisi !", vbOKOnly, "Peringatan"
        Exit Sub
    End If
End Sub
```



```
m = CDb1(Text1(0).Text)
CC = CDb1(Text1(1).Text)
Tho = CDb1(Text1(2).Text)
P = CLng(Text1(6).Text)
NumSpec = fgrid.Rows - 1

For i = 1 To NumSpec
    DataSpec(i - 1).a = CDb1(fgrid.TextMatrix(i, 1))
    DataSpec(i - 1).c = CDb1(fgrid.TextMatrix(i, 2))
    DataSpec(i - 1).h = CDb1(fgrid.TextMatrix(i, 3))
    CalcFatigueLife i - 1
    fgrid.TextMatrix(i, 4) = Format(DataSpec(i - 1).NCalc, "##0.000")
Next
Erase N
Erase K
End Sub

Private Function CheckGrid() As Boolean
    Dim isValid As Boolean, i As Long
    isValid = True
    For i = 1 To fgrid.Rows - 1
        isValid = isValid And (fgrid.TextMatrix(i, 0) <> "") And _
            (fgrid.TextMatrix(i, 1) <> "") And (fgrid.TextMatrix(i, 2) <> "") And _
            (fgrid.TextMatrix(i, 3) <> "")
    Next
    CheckGrid = isValid
End Function

Private Sub btnViewChart_Click()
    Dim i As Long

    If Not CheckGrid Then
        MsgBox "Semua input dalam grid harus terisi!", vbOKOnly, "Peringatan"
        Exit Sub
    End If

    With ChartFrm
        If fgrid.Row > 0 Then
            CalcFatigueLife fgrid.Row - 1

            .Chart.ChartArea.Axes("X").MajorGrid.Spacing.IsDefault = True
            .Chart.ChartArea.Axes("Y").MajorGrid.Spacing.IsDefault = True

            .Chart.ChartArea.Axes("X").Title = "Pertambahan N"
            .Chart.ChartArea.Axes("Y").Title = "Delta K"
        End If
    End With
End Sub
```



```
.Chart.ChartArea.Axes("Y").TitleRotation = 2

With .Chart.ChartGroups(1).Data
'Set up Chart1 Series and Points
    .NumSeries = 1
    .NumPoints(1) = P

    .CopyXVectorIn 1, N
    .CopyYVectorIn 1, K
End With

.Caption = "Chart Delta K terhadap Pertambahan N untuk Spesimen " &
fgrid.TextMatrix(fgrid.Row, 0)
.Show
End If
End With
Erase N
Erase K
End Sub
```







## MODUL FATIGUE LIFE

Const Phi = 3.14159265358979

Public m As Double  
Public CC As Double  
Public Tho As Double  
Public P As Long

Type TDataSpec  
a As Double  
c As Double  
h As Double  
NCalc As Double  
End Type

Public DataSpec(20) As TDataSpec  
Public NumSpec As Long  
Public K() As Double  
Public N() As Double

Function AlmostEqual(x, y) As Boolean  
AlmostEqual = (Abs(x - y) <= 0.0000000001)  
End Function

Function Xo1\_Y0(x As Double) As Double  
Xo1\_Y0 = 1.2849 \* x \* x \* x - 0.7105 \* x \* x + 0.2194 \* x + 0.9975  
End Function

Function Xo1\_Y01(x As Double) As Double  
Xo1\_Y01 = 2.5784 \* x \* x \* x - 2.0583 \* x \* x + 0.508 \* x + 0.9833  
End Function

Function Xo1\_Y02(x As Double) As Double  
Xo1\_Y02 = 1.499 \* x \* x \* x - 1.0097 \* x \* x + 0.2622 \* x + 0.9907  
End Function

Function Xo1\_Y04(x As Double) As Double  
Xo1\_Y04 = 0.9063 \* x \* x \* x - 0.4968 \* x \* x + 0.1015 \* x + 0.9969  
End Function

Function Xo1\_Y06(x As Double) As Double  
Xo1\_Y06 = 0.9125 \* x \* x \* x - 0.604 \* x \* x + 0.125 \* x + 0.9961  
End Function

Function Xo1\_Y08(x As Double) As Double



```
Xo1_Y08 = 0.8576 * x * x * x - 0.6066 * x * x + 0.1163 * x + 0.9969  
End Function
```

```
Function Xo1_Y001(a_per_c As Double, a_per_h As Double) As Double  
    Dim temp As Double  
    temp = Xo1_Y0(a_per_h)  
    Xo1_Y001 = 10 * a_per_c * (Xo1_Y01(a_per_h) - temp) + temp  
End Function
```

```
Function Xo1_Y0102(a_per_c As Double, a_per_h As Double) As Double  
    Dim temp As Double  
    temp = Xo1_Y01(a_per_h)  
    Xo1_Y0102 = ((a_per_c - 0.1) / 0.1) * (Xo1_Y02(a_per_h) - temp) + temp  
End Function
```

```
Function Xo1_Y0204(a_per_c As Double, a_per_h As Double) As Double  
    Dim temp As Double  
    temp = Xo1_Y02(a_per_h)  
    Xo1_Y0204 = ((a_per_c - 0.2) / 0.2) * (Xo1_Y04(a_per_h) - temp) + temp  
End Function
```

```
Function Xo1_Y0406(a_per_c As Double, a_per_h As Double) As Double  
    Dim temp As Double  
    temp = Xo1_Y04(a_per_h)  
    Xo1_Y0406 = ((a_per_c - 0.4) / 0.2) * (Xo1_Y06(a_per_h) - temp) + temp  
End Function
```

```
Function Xo1_Y0608(a_per_c As Double, a_per_h As Double) As Double  
    Dim temp As Double  
    temp = Xo1_Y06(a_per_h)  
    Xo1_Y0608 = ((a_per_c - 0.6) / 0.2) * (Xo1_Y08(a_per_h) - temp) + temp  
End Function
```

```
Function Xo1(a_per_c As Double, a_per_h As Double) As Double  
    If AlmostEqual(a_per_c, 0) Then  
        Xo1 = Xo1_Y0(a_per_h)  
    ElseIf (a_per_c > 0) And (a_per_c < 0.1) Then  
        Xo1 = Xo1_Y001(a_per_c, a_per_h)  
    ElseIf AlmostEqual(a_per_c, 0.1) Then  
        Xo1 = Xo1_Y01(a_per_h)  
    ElseIf (a_per_c > 0.1) And (a_per_c < 0.2) Then  
        Xo1 = Xo1_Y0102(a_per_c, a_per_h)  
    ElseIf AlmostEqual(a_per_c, 0.2) Then  
        Xo1 = Xo1_Y02(a_per_h)  
    ElseIf (a_per_c > 0.2) And (a_per_c < 0.4) Then  
        Xo1 = Xo1_Y0204(a_per_c, a_per_h)
```



```
ElseIf AlmostEqual(a_per_c, 0.4) Then
    Xo1 = Xo1_Y04(a_per_h)
ElseIf (a_per_c > 0.4) And (a_per_c < 0.6) Then
    Xo1 = Xo1_Y0406(a_per_c, a_per_h)
ElseIf AlmostEqual(a_per_c, 0.6) Then
    Xo1 = Xo1_Y06(a_per_h)
ElseIf (a_per_c > 0.6) And (a_per_c < 0.8) Then
    Xo1 = Xo1_Y0608(a_per_c, a_per_h)
ElseIf AlmostEqual(a_per_c, 0.8) Then
    Xo1 = Xo1_Y08(a_per_h)
End If
End Function

Function Xo2_Y02(x As Double) As Double
    Xo2_Y02 = -0.3375 * x * x * x + 0.3842 * x * x - 0.0758 * x + 1.0013
End Function

Function Xo2_Y06(x As Double) As Double
    Xo2_Y06 = 0.0628 * x * x * x + 0.0096 * x * x - 0.01 * x + 1.0004
End Function

Function Xo2_Y1(x As Double) As Double
    Xo2_Y1 = 0.2778 * x * x * x - 0.3393 * x * x + 0.1323 * x + 0.9835
End Function

Function Xo2_Y0206(a_per_c As Double, a_per_h As Double) As Double
    Dim temp As Double
    temp = Xo2_Y02(a_per_h)
    Xo2_Y0206 = ((a_per_c - 0.2) / 0.4) * (Xo2_Y06(a_per_h) - temp) + temp
End Function

Function Xo2_Y061(a_per_c As Double, a_per_h As Double) As Double
    Dim temp As Double
    temp = Xo2_Y06(a_per_h)
    Xo2_Y061 = ((a_per_c - 0.6) / 0.4) * (Xo2_Y1(a_per_h) - temp) + temp
End Function

Function Xo2(a_per_c As Double, a_per_h As Double) As Double
    If AlmostEqual(a_per_c, 0.2) Then
        Xo2 = Xo2_Y02(a_per_h)
    ElseIf (a_per_c > 0.2) And (a_per_c < 0.6) Then
        Xo2 = Xo2_Y0206(a_per_c, a_per_h)
    ElseIf AlmostEqual(a_per_c, 0.6) Then
        Xo2 = Xo2_Y06(a_per_h)
    ElseIf (a_per_c > 0.6) And (a_per_c < 1) Then
        Xo2 = Xo2_Y061(a_per_c, a_per_h)
    End If
End Function
```





```
ElseIf AlmostEqual(a_per_c, 1) Then
```

```
    Xo2 = Xo2_Y1(a_per_h)
```

```
End If
```

```
End Function
```

```
Function Xo3_Y0(x As Double) As Double
```

```
    Xo3_Y0 = 1.554 * x * x * x + 0.0857 * x * x + 0.0186 * x + 0.9985
```

```
End Function
```

```
Function Xo3_Y01(x As Double) As Double
```

```
    Xo3_Y01 = 0.1297 * x * x * x + 0.0418 * x * x + 0.019 * x + 0.999
```

```
End Function
```

```
Function Xo3_Y02(x As Double) As Double
```

```
    Xo3_Y02 = 0.1022 * x * x * x + 0.0355 * x * x + 0.0076 * x + 0.9992
```

```
End Function
```

```
Function Xo3_Y04(x As Double) As Double
```

```
    Xo3_Y04 = 0.0409 * x * x * x + 0.0689 * x * x - 0.0232 * x + 1.0007
```

```
End Function
```

```
Function Xo3_Y06(x As Double) As Double
```

```
    Xo3_Y06 = 0.097 * x * x * x - 0.0391 * x * x - 0.0015 * x + 1.0004
```

```
End Function
```

```
Function Xo3_Y1(x As Double) As Double
```

```
    Xo3_Y1 = 0.4167 * x * x * x - 0.6964 * x * x + 0.3833 * x + 0.9304
```

```
End Function
```

```
Function Xo3_Y001(a_per_c As Double, a_per_h As Double) As Double
```

```
    Dim temp As Double
```

```
    temp = Xo3_Y0(a_per_h)
```

```
    Xo3_Y001 = (a_per_c / 0.1) * (Xo3_Y01(a_per_h) - temp) + temp
```

```
End Function
```

```
Function Xo3_Y0102(a_per_c As Double, a_per_h As Double) As Double
```

```
    Dim temp As Double
```

```
    temp = Xo1_Y01(a_per_h)
```

```
    Xo3_Y0102 = ((a_per_c - 0.1) / 0.1) * (Xo3_Y02(a_per_h) - temp) + temp
```

```
End Function
```

```
Function Xo3_Y0204(a_per_c As Double, a_per_h As Double) As Double
```

```
    Dim temp As Double
```

```
    temp = Xo3_Y02(a_per_h)
```

```
    Xo3_Y0204 = ((a_per_c - 0.2) / 0.2) * (Xo3_Y04(a_per_h) - temp) + temp
```

```
End Function
```



```
Function Xo3_Y0406(a_per_c As Double, a_per_h As Double) As Double
    Dim temp As Double
    temp = Xo3_Y04(a_per_h)
    Xo3_Y0406 = ((a_per_c - 0.4) / 0.2) * (Xo3_Y06(a_per_h) - temp) + temp
End Function
```

```
Function Xo3_Y061(a_per_c As Double, a_per_h As Double) As Double
    Dim temp As Double
    temp = Xo3_Y06(a_per_h)
    Xo3_Y061 = ((a_per_c - 0.6) / 0.4) * (Xo3_Y1(a_per_h) - temp) + temp
End Function
```

```
Function Xo3(a_per_c As Double, a_per_h As Double) As Double
    If AlmostEqual(a_per_c, 0) Then
        Xo3 = Xo3_Y0(a_per_h)
    ElseIf (a_per_c > 0) And (a_per_c < 0.1) Then
        Xo3 = Xo3_Y001(a_per_c, a_per_h)
    ElseIf AlmostEqual(a_per_c, 0.1) Then
        Xo3 = Xo3_Y01(a_per_h)
    ElseIf (a_per_c > 0.1) And (a_per_c < 0.2) Then
        Xo3 = Xo3_Y0102(a_per_c, a_per_h)
    ElseIf AlmostEqual(a_per_c, 0.2) Then
        Xo3 = Xo3_Y02(a_per_h)
    ElseIf (a_per_c > 0.2) And (a_per_c < 0.4) Then
        Xo3 = Xo3_Y0204(a_per_c, a_per_h)
    ElseIf AlmostEqual(a_per_c, 0.4) Then
        Xo3 = Xo3_Y04(a_per_h)
    ElseIf (a_per_c > 0.4) And (a_per_c < 0.6) Then
        Xo3 = Xo3_Y0406(a_per_c, a_per_h)
    ElseIf AlmostEqual(a_per_c, 0.6) Then
        Xo3 = Xo3_Y06(a_per_h)
    ElseIf (a_per_c > 0.6) And (a_per_c < 1) Then
        Xo3 = Xo3_Y061(a_per_c, a_per_h)
    ElseIf AlmostEqual(a_per_c, 1) Then
        Xo3 = Xo3_Y1(a_per_h)
    End If
End Function
```

```
Function XoN(a_per_c As Double) As Double
    XoN = 1 / Sqr(1 + 1.47 * a_per_c ^ 2.64)
End Function
```

```
Sub CalcFatigueLife(idx As Long)
    Dim ai As Double
    Dim ci As Double
```



```
Dim ai_per_ci As Double
Dim ai_per_h As Double
Dim da As Double
Dim dc As Double
Dim fm As Double
Dim Pi As Long

ReDim K(P - 1) As Double
ReDim N(P - 1) As Double

DataSpec(idx).NCalc = 0
Pi = 0
ai = DataSpec(idx).a
ci = DataSpec(idx).c
ai_per_ci = ai / ci
ai_per_h = ai / DataSpec(idx).h
fm = Tho * XoN(ai_per_ci) * (1 + (Xo1(ai_per_ci, ai_per_h) - 1) +
(Xo2(ai_per_ci, ai_per_h) - 1) + (Xo3(ai_per_ci, ai_per_h) - 1))
K(Pi) = fm * Sqr(Phi * ai)
da = (DataSpec(idx).h - ai) / P
N(Pi) = da / (CC * (K(Pi) ^ m))
DataSpec(idx).NCalc = DataSpec(idx).NCalc + N(Pi)
dc = N(Pi) * CC * (K(Pi) ^ m)

Do While Pi < P - 1
    Pi = Pi + 1
    ai = ai + da
    ci = ci + dc
    ai_per_ci = ai / ci
    ai_per_h = ai / DataSpec(idx).h
    fm = Tho * XoN(ai_per_ci) * (1 + (Xo1(ai_per_ci, ai_per_h) - 1) +
(Xo2(ai_per_ci, ai_per_h) - 1) + (Xo3(ai_per_ci, ai_per_h) - 1))
    K(Pi) = fm * Sqr(Phi * ai)
    da = (DataSpec(idx).h - ai) / P
    N(Pi) = da / (CC * (K(Pi) ^ m))
    DataSpec(idx).NCalc = DataSpec(idx).NCalc + N(Pi)
    dc = N(Pi) * CC * (K(Pi) ^ m)
Loop
End Sub
```





## I. Model Tampilan Form

**Perhitungan Fatigue Life**

[ Konstanta ]

m =     C =     Tho =

Tambah    Hapus    Chart

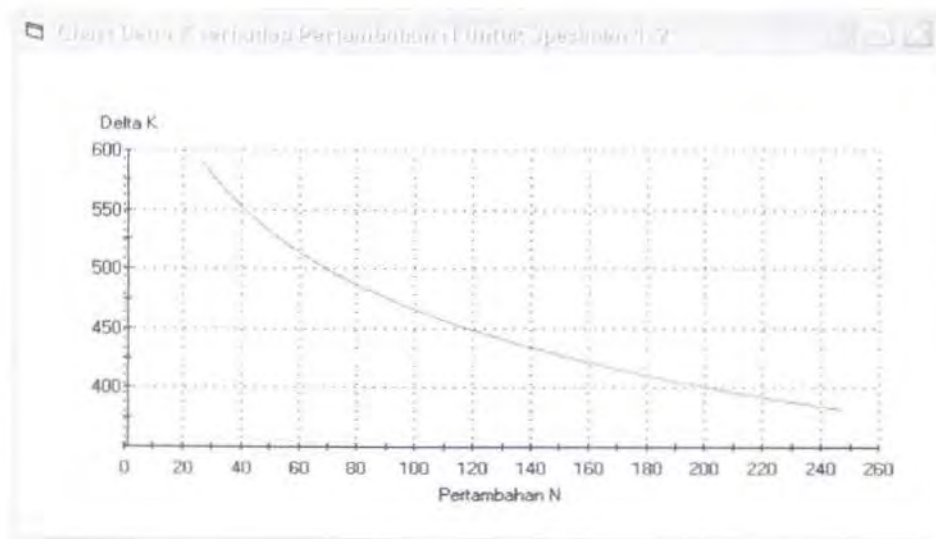
Nama Spesimen	a (mm)	c (mm)	h (mm)	NCalc (cycle)
1.2	1.56	5.4	3.46	31758.485
2.1	1.64	5.85	3.34	25670.413
2.2	1.5	5.62	3.15	27793.719
3.1	1.13	3.93	4.43	79396.477
3.3	1.58	5.25	4.18	43675.500
3.4	1.25	5.13	4.25	61008.637

[ Input Data ]

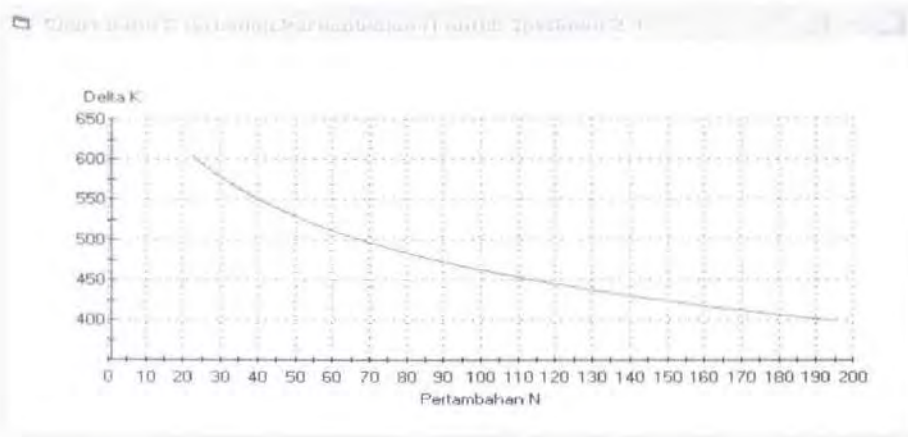
P =

Gambar. Lampiran. A.1 Form Tampilan Perhitungan Fatigue Life

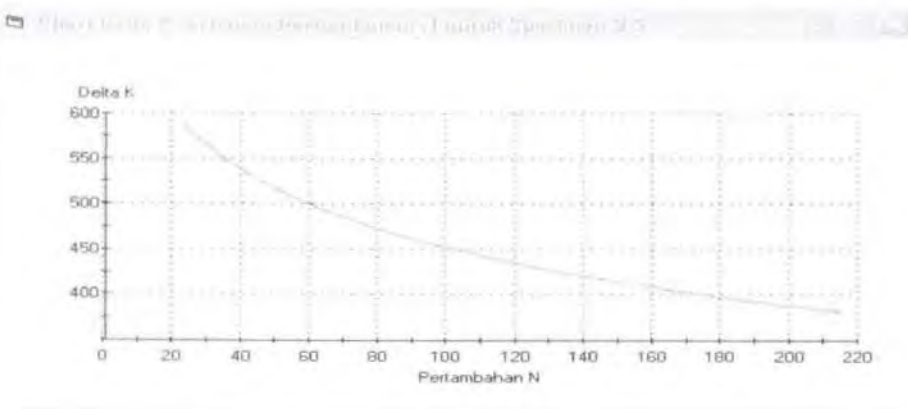
## II. Visualisasi Program



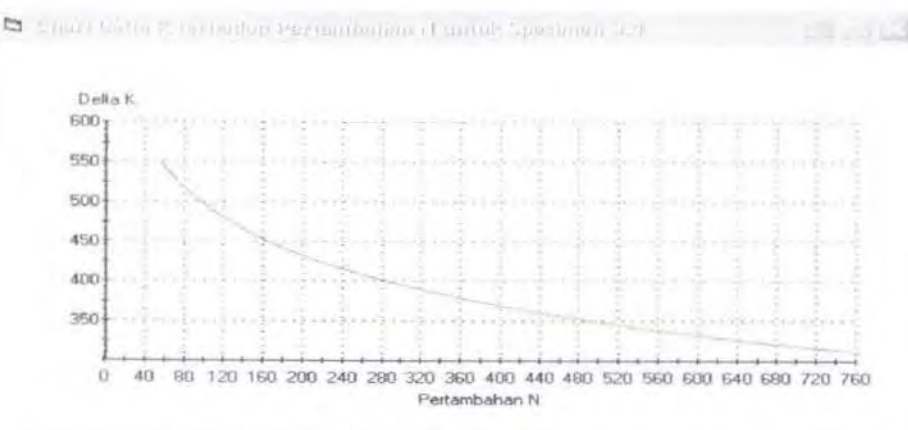
Gambar Lampiran A.2. Kurva  $\Delta K$  terhadap Pertambahan N Spesimen 1.2



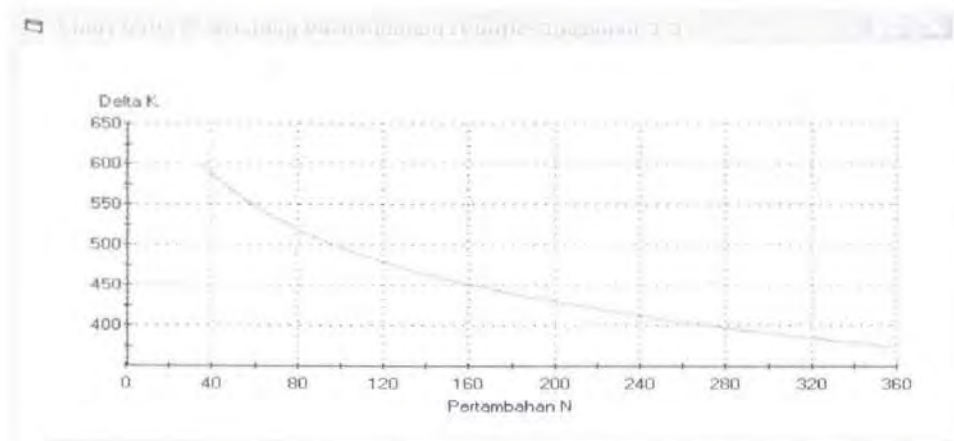
Gambar. Lampiran A.3. Kurva  $\Delta K$  Terhadap Pertambahan N Spesimen.2.1



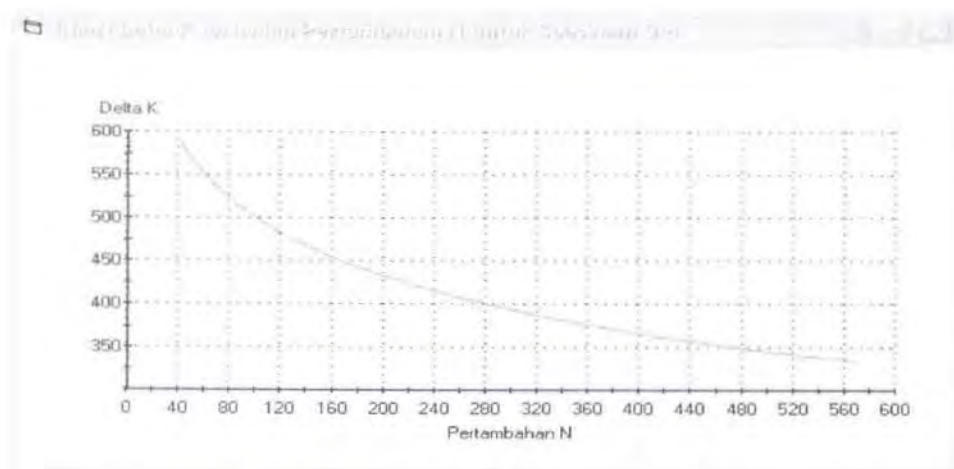
Gambar Lamp. A.4. Kurva  $\Delta K$  terhadap Pertambahan N Spesimen.2.2



Gambar Lamp. A.5. Kurva  $\Delta K$  terhadap Pertambahan N Spesimen.3.1



Gambar Lamp. A.6. Kurva  $\Delta K$  terhadap Pertambahan N Spesimen.3.3



Gambar. Lamp. A.7. Kurva  $\Delta K$  terhadap Pertambahan N Spesimen.3.4



# LAMPIRAN

B

program

perhitungan

parameter

Weibull



## PROGRAM PERKIRAAN PARAMETER WEIBULL

### FORM WEIBULL

*'Program tampilan form'*

Dim cellRow As Long, cellCol As Long

Private Sub Form\_Load()

Dim i As Long

fgrid.Rows = 2

fgrid.Cols = 7

fgrid.FixedRows = 1

fgrid.FixedCols = 0

fgrid.TextMatrix(0, 0) = "Nama Spesimen"

fgrid.TextMatrix(0, 1) = "N Awal (cycle)"

fgrid.TextMatrix(0, 2) = "N Akhir (cycle)"

fgrid.TextMatrix(0, 3) = "Interval"

fgrid.TextMatrix(0, 4) = "Alpha"

fgrid.TextMatrix(0, 5) = "Beta"

fgrid.TextMatrix(0, 6) = "Gamma"

For i = 0 To 6

fgrid.ColAlignmentFixed(i) = flexAlignCenterCenter

fgrid.ColWidth(i) = TextWidth(fgrid.TextMatrix(0, i)) + 400

If i = 0 Then

fgrid.ColAlignment(i) = flexAlignLeftCenter

Else

fgrid.ColAlignment(i) = flexAlignRightCenter

End If

Next

cmbChartType.AddItem "PDF Spesimen"

cmbChartType.AddItem "Laju Kegagalan Spesimen"

cmbChartType.AddItem "Keandalan Spesimen"

cmbChartType.Text = "PDF Spesimen"

cmbChartType.ListIndex = 0

End Sub

*'Program pengaturan letak input'*

Sub ShowCellEditor()

With fgrid

' Cancel range selection, if any.

.RowSel = .Row

.ColSel = .Col

' Move the cell editor into place by making it one pixel smaller  
' than the current cell.

txtCellEditor.Move .Left + .CellLeft, .Top + .CellTop, \_  
.CellWidth - ScaleX(1, vbPixels, vbTwips), \_





```
        .CellHeight - ScaleY(1, vbPixels, vbTwips)
    ' Transfer the contents of the current cell into the TextBox.
    txtCellEditor.Text = .Text
    ' Move the TextBox in front of the grid.
    txtCellEditor.Visible = True
    txtCellEditor.ZOrder
    txtCellEditor.SetFocus
    ' Remember current coordinates for later.
    cellRow = .Row
    cellCol = .Col
End With
End Sub

'Program menghapus dan menambah input'
Sub HideCellEditor(Optional Cancel As Boolean)
    ' Hide the TextBox control if necessary.
    If txtCellEditor.Visible Then
        ' If the operation hasn't been canceled, transfer the contents
        ' of the TextBox into the cell that was active.
        If Not Cancel Then
            fgrid.TextMatrix(cellRow, cellCol) = txtCellEditor.Text
        End If
        txtCellEditor.Visible = False
        fgrid.SetFocus
    End If
End Sub

Private Sub fgrid_DblClick()
    If fgrid.Col < 4 Then
        ShowCellEditor
    End If
End Sub

'Program tampilan jumlah kolom'
Private Sub fgrid_KeyPress(KeyAscii As Integer)
    If fgrid.Col < 4 Then
        ShowCellEditor
        ' If it's an alphanumeric key, it is passed to the TextBox.
        If KeyAscii >= 32 Then
            txtCellEditor.Text = Chr$(KeyAscii)
            txtCellEditor.SelStart = 1
        End If
    End If
End Sub

Private Sub txtCellEditor_LostFocus()
```





```
HideCellEditor  
End Sub
```

```
Private Sub txtCellEditor_KeyPress(KeyAscii As Integer)  
    Select Case KeyAscii  
        Case 13  
            HideCellEditor  
        Case 27  
            HideCellEditor True ' Also cancel the edit.  
    End Select  
End Sub
```

```
Private Sub btnAddSpec_Click()  
    fgrid.Rows = fgrid.Rows + 1  
End Sub
```

```
Private Sub btnDelSpec_Click()  
    Dim i As Long, j As Long  
    If fgrid.Row > 0 Then  
        If fgrid.Rows = 2 Then  
            For j = 0 To fgrid.Cols - 1  
                fgrid.TextMatrix(fgrid.Row, j) = ""  
            Next  
        ElseIf fgrid.Rows > 2 Then  
            If fgrid.Row < fgrid.Rows Then  
                For i = fgrid.Row To fgrid.Rows - 2  
                    For j = 0 To fgrid.Cols - 1  
                        fgrid.TextMatrix(i, j) = fgrid.TextMatrix(i + 1, j)  
                    Next  
                Next  
            ElseIf fgrid.Row = fgrid.Rows - 1 Then  
                For j = 0 To fgrid.Cols - 1  
                    fgrid.TextMatrix(fgrid.Row, j) = ""  
                Next  
            End If  
            fgrid.Rows = fgrid.Rows - 1  
        End If  
    End If  
End Sub
```

```
Private Function CheckInput() As Boolean  
    Dim isValid As Boolean, i As Long  
    isValid = True  
    For i = 1 To fgrid.Rows - 1  
        isValid = isValid And (fgrid.TextMatrix(i, 0) <> "") And _  
            (fgrid.TextMatrix(i, 1) <> "") And (fgrid.TextMatrix(i, 2) <> "") And _
```



```
(fgrid.TextMatrix(i, 3) <> "")
Next
CheckInput = isValid
End Function

Private Sub btnProses_Click()
    Dim awal As Long, akhir As Long, interval As Long, temp As Long
    Dim idx As Long, i As Long, numData As Long

    If Not CheckInput Then
        MsgBox "Input Data Masih Kosong!", vbOKOnly, "Peringatan"
        Exit Sub
    End If

    For idx = 1 To fgrid.Rows - 1
        awal = CLng(fgrid.TextMatrix(idx, 1))
        akhir = CLng(fgrid.TextMatrix(idx, 2))
        interval = CLng(fgrid.TextMatrix(idx, 3))
        numData = ((akhir - awal) / interval) + 1

        ReDim Data(numData - 1) As Double

        temp = awal
        For i = 0 To numData - 1
            Data(i) = temp
            temp = temp + interval
        Next

        Run 2, 0.001

        fgrid.TextMatrix(idx, 4) = Format(best_alpha, "##0.000")
        fgrid.TextMatrix(idx, 5) = Format(best_beta, "##0.000")
        fgrid.TextMatrix(idx, 6) = Format(best_gamma, "##0.000")

        Erase Data
    Next

End Sub

Private Function CheckGrid() As Boolean
    Dim isValid As Boolean, i As Long
    isValid = True
    For i = 1 To fgrid.Rows - 1
        isValid = isValid And (fgrid.TextMatrix(i, 0) <> "") And _
            (fgrid.TextMatrix(i, 1) <> "") And (fgrid.TextMatrix(i, 2) <> "") And _
```



```
(fgrid.TextMatrix(i, 3) <> "") And (fgrid.TextMatrix(i, 4) <> "") And _
(fgrid.TextMatrix(i, 5) <> "") And (fgrid.TextMatrix(i, 6) <> "")
Next
CheckGrid = isValid
End Function

Private Sub btnViewChart_Click()
    Dim awal As Long, akhir As Long, interval As Long, temp As Long
    Dim i As Long, numData As Long, calpha As Double, cbeta As Double,
        cgamma As Double, tempgamma As Double
    Dim x() As Double, y() As Double

    If fgrid.Row = 0 Then Exit Sub

    If Not CheckGrid Then
        MsgBox "Data Masih Kosong / Perhitungan belum dilakukan !", vbOKOnly,
            "Peringatan"
        Exit Sub
    End If

    awal = CLng(fgrid.TextMatrix(fgrid.Row, 1))
    akhir = CLng(fgrid.TextMatrix(fgrid.Row, 2))
    interval = CLng(fgrid.TextMatrix(fgrid.Row, 3))
    numData = ((akhir - awal) / interval) + 1

    ReDim x(numData - 1) As Double
    ReDim y(numData - 1) As Double

    temp = awal
    For i = 0 To numData - 1
        x(i) = temp
        temp = temp + interval
    Next

    Sort x, numData, False

    calpha = CDbf(fgrid.TextMatrix(fgrid.Row, 4))
    cbeta = CDbf(fgrid.TextMatrix(fgrid.Row, 5))
    cgamma = CDbf(fgrid.TextMatrix(fgrid.Row, 6))

    With ChartFrm
        'With .Chart.ChartArea.Axes("X")
        '    .Min = 0
        '    .Max = numData
        'End With
```





```
'With .Chart.ChartArea.Axes("Y")
' .Min = 0
' .Max = 1
'End With

.Chart.ChartArea.Axes("X").MajorGrid.Spacing.IsDefault = True
.Chart.ChartArea.Axes("Y").MajorGrid.Spacing.IsDefault = True

.Chart.ChartArea.Axes("X").Title = "N"

If cgamma <= 0 Then
    tempgamma = 0
Else
    tempgamma = cgamma
End If

Select Case cmbChartType.ListIndex
    Case 0
        .Chart.ChartArea.Axes("Y").Title = "PDF"
        .Chart.Header.Text = "Kurva PDF (alpha = " & Format(calpha, "###0.00") & _
            ", beta = " & Format(cbeta, "###0.00") & _
            ", gamma = " & Format(tempgamma, "###0.00") & ")"
    Case 1
        .Chart.ChartArea.Axes("Y").Title = "Laju Kegagalan"
        .Chart.Header.Text = "Kurva Laju Kegagalan (alpha = " & Format(calpha, "###0.00") & _
            ", beta = " & Format(cbeta, "###0.00") & _
            ", gamma = " & Format(tempgamma, "###0.00") & ")"
    Case 2
        .Chart.ChartArea.Axes("Y").Title = "Keandalan"
        .Chart.Header.Text = "Kurva Keandalan (alpha = " & Format(calpha, "###0.00") & _
            ", beta = " & Format(cbeta, "###0.00") & _
            ", gamma = " & Format(tempgamma, "###0.00") & ")"
End Select
.Chart.ChartArea.Axes("Y").TitleRotation = 2

With .Chart.ChartGroups(1).Data
    'Set up Chart1 Series and Points
    .NumSeries = 1
    .NumPoints(1) = numData

    .CopyXVectorIn 1, x
    Select Case cmbChartType.ListIndex
        Case 0
            Calculate_PDF_Weibull x, y, calpha, cbeta, cgamma
        Case 1
            Calculate_Failure_Rate_Weibull x, y, calpha, cbeta, cgamma
        Case 2
            Calculate_Reliability_Weibull x, y, calpha, cbeta, cgamma
```





```
End Select
.CopyYVectorIn 1, y
End With

.Caption = "Kurva " & .Chart.ChartArea.Axes("Y").Title & " untuk
specimen " & fgrid.TextMatrix(fgrid.Row, 0)
.Show
End With
Erase y
Erase x
End Sub
```



## MODUL WEIBULL

```
Public Data() As Double, Sorted_Data() As Double
Public best_alpha As Double, best_beta As Double, best_gamma As Double
```

```
Function AlmostEqual(x, y) As Boolean
    AlmostEqual = (Abs(x - y) <= 0.0000000001)
End Function
```

```
Function Log10(Number As Double) As Double
    Log10 = Log(Number) / 2.30258509299405
End Function
```

*'Program sortir data mentah'*

```
Sub Run(mode As Byte, resolution As Double)
    Dim N As Long
```

```
    N = UBound(Data()) + 1
    '---Sort:---
    Sorted_Data() = Data()
    Sort Sorted_Data, N, False
```

```
    '---Rank Probability:---
    Dim w() As Double
    Rank_Prob N, w()
```

```
    '---Seek for best parameter:---
    Finding_Best_Parameter mode, w, resolution
End Sub
```

```
Sub Sort(arr As Variant, numEls As Long, descending As Boolean)
    Dim index As Long, index2 As Long, firstItem As Long
    Dim distance As Long, value As Variant
    If VarType(arr) < vbArray Then Exit Sub
    firstItem = LBound(arr)
    Do
        distance = distance * 3 + 1
    Loop Until distance > numEls
    Do
        distance = distance \ 3
        For index = distance + firstItem To numEls + firstItem - 1
            value = arr(index)
            index2 = index
            Do While (arr(index2 - distance) > value) Xor descending
                arr(index2) = arr(index2 - distance)
                index2 = index2 - distance
            Loop
        Next index
    Loop
```





```
        If index2 - distance < firstItem Then Exit Do
    Loop
    arr(index2) = value
Next
Loop Until distance = 1
End Sub
```

*'Program ranking data'*

```
Sub Rank_Prob(N As Long, w() As Double)
    Dim i As Long, prob As Double, p() As Double
    ReDim w(N - 1) As Double
    For i = 1 To N
        prob = (i - 1) / N
        w(i - 1) = Log(1 / (1 - prob))
    Next i
End Sub
```

*'Program iterasi mendapatkan alpha, beta, gamma dan SSE'*

```
Private Sub Finding_Best_Parameter(mode As Byte, w As Variant, resolution As
    Double)
    Dim alpha As Double, beta As Double, gamma As Double
    Dim StepUp As Long, Step As Long, N As Long
    Dim old_sse As Double, new_sse As Double
    Dim d As Double, e As Double, f As Double, g As Double, Divisor As Double
    Dim best_sse As Double
    Dim est_x() As Double

    N = UBound(Sorted_Data()) + 1
    ReDim Preserve est_x(N - 1)
    old_sse = 1.79769313486231E+308
    best_sse = 1.79769313486231E+308

    Select Case mode
    Case 0
        alpha = 0
        Do While alpha < 1
            alpha = alpha + resolution
            d = get_d(Sorted_Data, w, alpha)
            e = get_e(Sorted_Data)
            f = get_f(w, alpha)
            g = get_g(w, alpha)
            Divisor = (N * g) - (f * f)
            beta = ((N * d) - (e * f)) / Divisor
            gamma = ((e * g) - (d * f)) / Divisor
            Calculate_Estimated_Value alpha, beta, gamma, w, est_x()
            new_sse = Calculate_SSE(est_x, Sorted_Data)
```



```
If new_sse < best_sse Then
    best_sse = new_sse
    best_alpha = alpha
    best_beta = beta
    best_gamma = gamma
End If
old_sse = new_sse
Loop
Case 1
    alpha = 1
    d = get_d(Sorted_Data, w, alpha)
    e = get_e(Sorted_Data)
    f = get_f(w, alpha)
    g = get_g(w, alpha)
    Divisor = (N * g) - (f * f)
    beta = ((N * d) - (e * f)) / Divisor
    gamma = ((e * g) - (d * f)) / Divisor
    best_alpha = alpha
    best_beta = beta
    best_gamma = gamma
Case 2
    alpha = 1
    Step = 0
    StepUp = 0
    Do Until StepUp > 5
        alpha = alpha + (Step * resolution)

        d = get_d(Sorted_Data, w, alpha)
        e = get_e(Sorted_Data)
        f = get_f(w, alpha)
        g = get_g(w, alpha)

        Divisor = (N * g) - (f * f)
        beta = ((N * d) - (e * f)) / Divisor
        gamma = ((e * g) - (d * f)) / Divisor

        Calculate_Estimated_Value alpha, beta, gamma, w, est_x()
        new_sse = Calculate_SSE(est_x, Sorted_Data)
        If new_sse < best_sse Then
            best_sse = new_sse
            best_alpha = alpha
            best_beta = beta
            best_gamma = gamma
        End If
        If new_sse > old_sse Then
            StepUp = StepUp + 1
```



```
ElseIf new_sse < old_sse Then
    StepUp = 0
End If
old_sse = new_sse
Step = Step + 1
Loop
End Select
End Sub
```

*'Program menghitung variabel bantu beta dan gamma'*

```
Function get_d(x As Variant, w As Variant, alpha As Double) As Double
    Dim i As Long, N As Long, sum As Double
    N = UBound(x)
    sum = 0
    For i = 0 To N
        sum = sum + (CDBl(x(i)) * (CDBl(w(i)) ^ (1 / alpha)))
    Next
    get_d = sum
End Function
```

```
Function get_e(x As Variant) As Double
    Dim i As Long, N As Long, sum As Double
    N = UBound(x)
    sum = 0
    For i = 0 To N
        sum = sum + CDBl(x(i))
    Next
    get_e = sum
End Function
```

```
Function get_f(w As Variant, alpha As Double) As Double
    Dim i As Long, N As Long, sum As Double
    N = UBound(w)
    sum = 0
    For i = 0 To N
        sum = sum + (CDBl(w(i)) ^ (1 / alpha))
    Next
    get_f = sum
End Function
```

```
Function get_g(w As Variant, alpha As Double) As Double
    Dim i As Integer, N As Long, sum As Double
    N = UBound(w)
    sum = 0
    For i = 0 To N
        sum = sum + (CDBl(w(i)) ^ (2 / alpha))
    Next
End Function
```





```
Next
get_g = sum
End Function

Sub Calculate_Estimated_Value(alpha As Double, beta As Double, gamma As
Double, _
    w As Variant, ByRef est_x() As Double)
Dim i As Long, N As Long
N = UBound(w)
For i = 0 To N
    est_x(i) = gamma + beta * (CDBl(w(i)) ^ (1 / alpha))
Next
End Sub

Function Calculate_SSE(est_x As Variant, x As Variant) As Double
Dim i As Integer, N As Long, sum As Double
N = UBound(x)
sum = 0
For i = 0 To N
    sum = sum + ((CDBl(est_x(i)) - CDBl(x(i))) ^ 2)
Next
Calculate_SSE = sum
End Function

'Program menghitung PDF'
Sub Calculate_PDF_Weibull(x As Variant, y As Variant, _
    alpha As Double, beta As Double, gamma As Double)
Dim i As Long, count As Long, result As Double, T As Double
count = UBound(x)
For i = 0 To count
    T = CDBl(x(i))
    If T <= gamma Then
        result = 0
    Else
        result = Exp(-1 * (((T - gamma) / beta) ^ alpha))
        result = (((T - gamma) / beta) ^ (alpha - 1)) * result
        result = (alpha / beta) * result
    End If
    y(i) = result
Next
End Sub

'Program menghitung CDF'
Sub Calculate_CDF_Weibull(x As Variant, y As Variant, _
    alpha As Double, beta As Double, gamma As Double)
Dim i As Long, count As Long, result As Double, T As Double
```



```
count = UBound(x)
For i = 0 To count
    T = CDBl(x(i))
    If T <= gamma Then
        result = 0
    Else
        result = Exp(-1 * (((T - gamma) / beta) ^ alpha))
        result = 1 - result
    End If
    y(i) = result
Next
End Sub
```

*'Program menghitung laju kegagalan'*

```
Sub Calculate_Failure_Rate_Weibull(x As Variant, y As Variant, _
    alpha As Double, beta As Double, gamma As Double)
    Dim i As Long, count As Long, result As Double, T As Double
    count = UBound(x)
    For i = 0 To count
        T = CDBl(x(i))
        If T <= gamma Then
            result = 0
        Else
            result = (((T - gamma) / beta) ^ Abs(alpha - 1))
            result = (alpha / beta) * result
        End If
        y(i) = result
    Next
End Sub
```

*'Program menghitung keandalan'*

```
Sub Calculate_Reliability_Weibull(x As Variant, y As Variant, _
    alpha As Double, beta As Double, gamma As Double)
    Dim i As Long, count As Long, result As Double, T As Double
    count = UBound(x)
    For i = 0 To count
        T = CDBl(x(i))
        If T <= gamma Then
            result = 0
        Else
            result = Exp(-1 * (((T - gamma) / beta) ^ alpha))
        End If
        y(i) = result
    Next
End Sub
```



Sub Calculate\_Decimal\_Log(x As Variant, y As Variant)

Dim i As Long, count As Long

count = UBound(x)

For i = 0 To count

y(i) = CDBl(x(i))

Next

End Sub

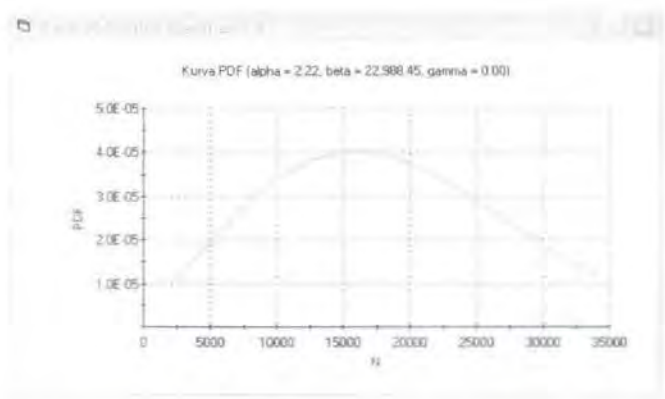
Hasil perhitungan program adalah

I. Tampilan Form dan Hasil Perhitungan Parameter Weibull

Penaksiran Parameter Weibull						
Tambah	Hapus	Type Chart : PDF Spesimen		Chart	Proses	
Nama Spesimen	N Amal (cycle)	N Akha (cycle)	Interval	Alpha	Beta	Gamma
1.2	2000	34000	1000	2.225	22988.448	-1589.538
2.1	2000	30000	2000	1.946	19321.781	330.116
2.2	2000	32000	2000	1.946	20571.057	227.659
3.1	2000	80000	2000	2.275	56545.263	-7528.269
3.3	2000	46000	1000	2.326	32314.024	-3844.384
3.4	2000	64000	1000	2.485	47520.410	-8348.545

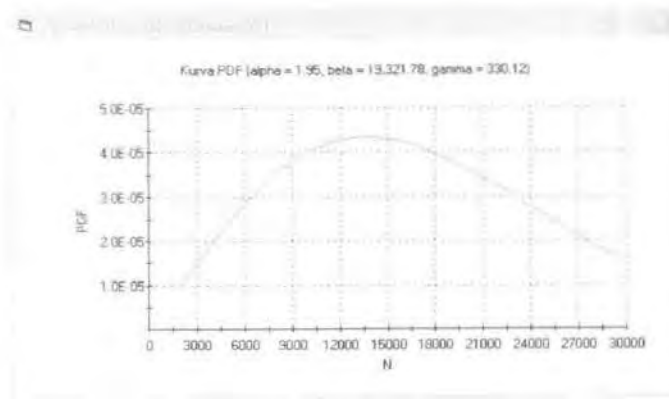
Gambar Lamp. B.1. Tampilan form Perkiraan Parameter Weibull

II. Kurva PDF Untuk Tiap Spesimen

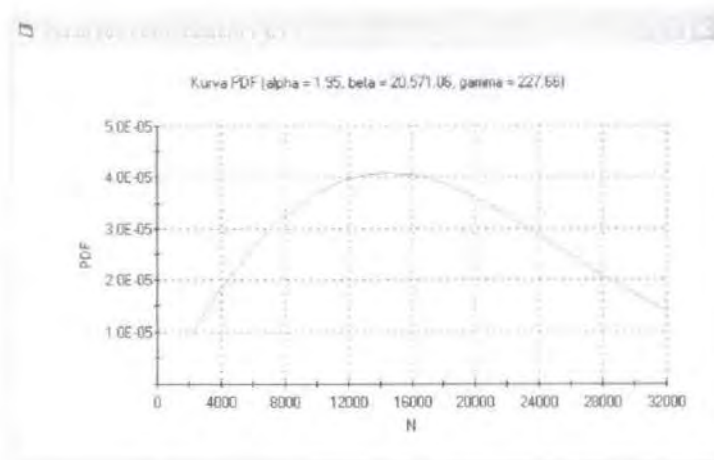


Gambar Lamp. B.2. Kurva PDF Spesimen 1.2

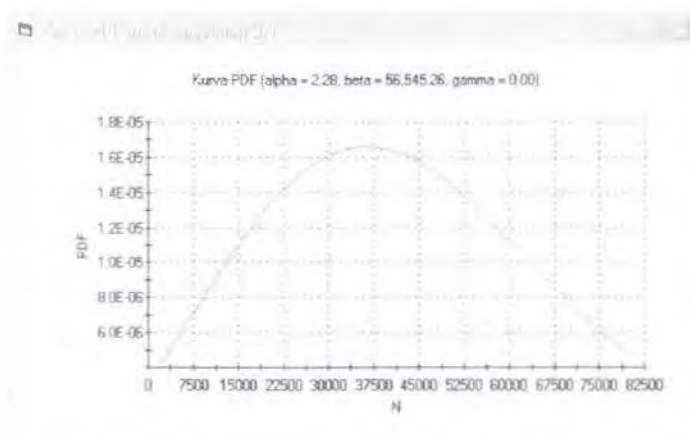




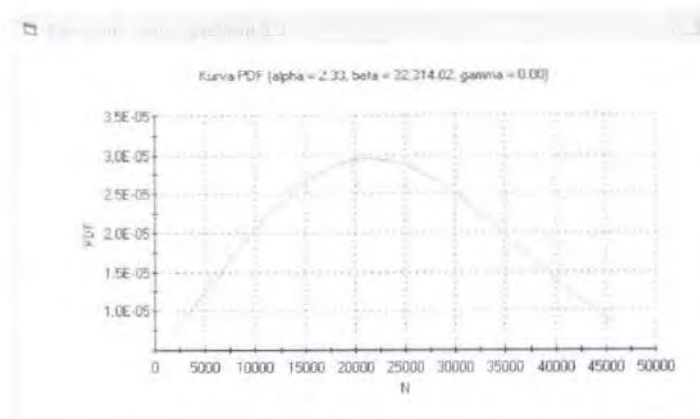
Gambar Lamp. B.3. Kurva PDF Spesimen 2.1



Gambar Lamp. B.4. Kurva PDF Spesimen 2.2



Gambar Lamp. B.5. Kurva PDF Spesimen 3.1

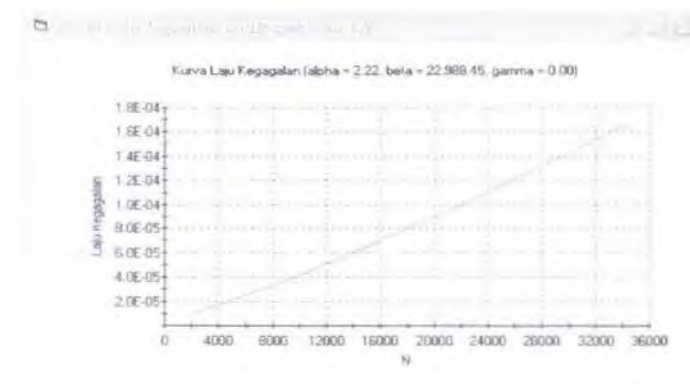


Gambar Lamp. B.6. Kurva PDF Spesimen 3.3

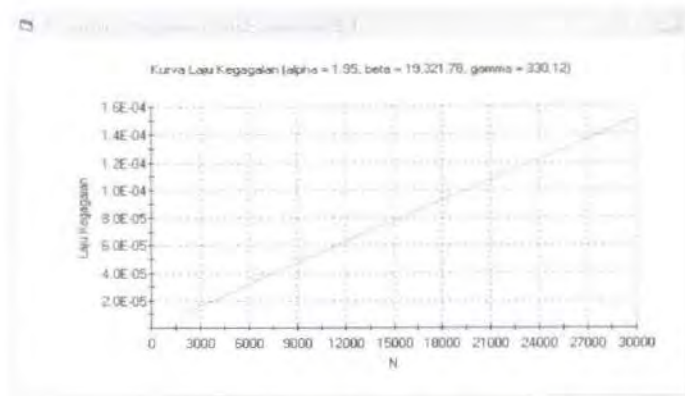


Gambar Lamp. B.7. Kurva PDF Spesimen 3.4

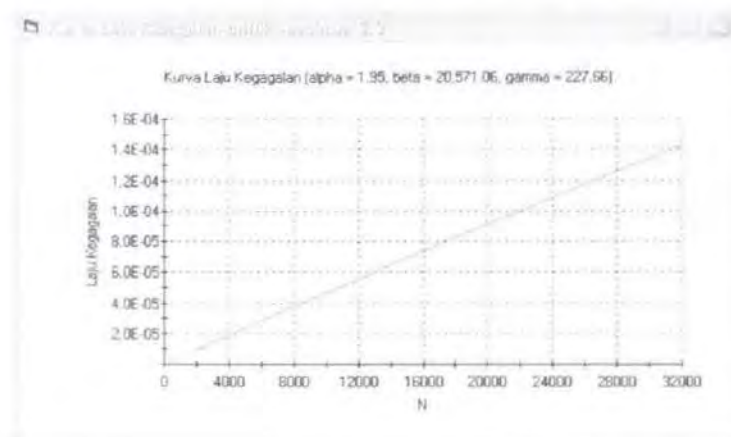
### III. Kurva Laju kegagalan Tiap Spesimen:



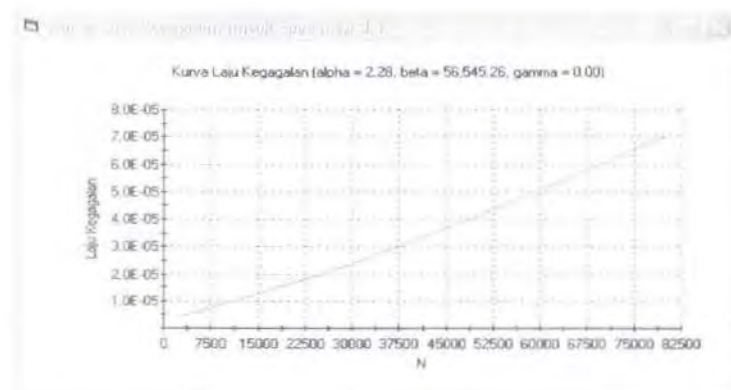
Gambar Lamp. B.8. Kurva Laju Kegagalan Spesimen 1.2



Gambar Lamp. B.9. Kurva Laju Kegagalan Spesimen 2.1

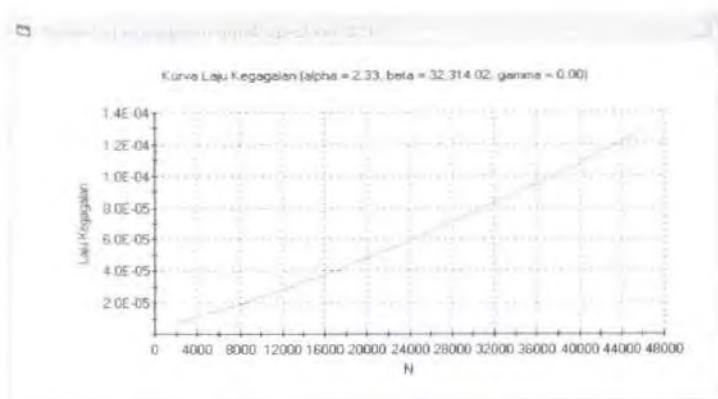


Gambar Lamp. B.10. Kurva Laju Kegagalan Spesimen 2.2

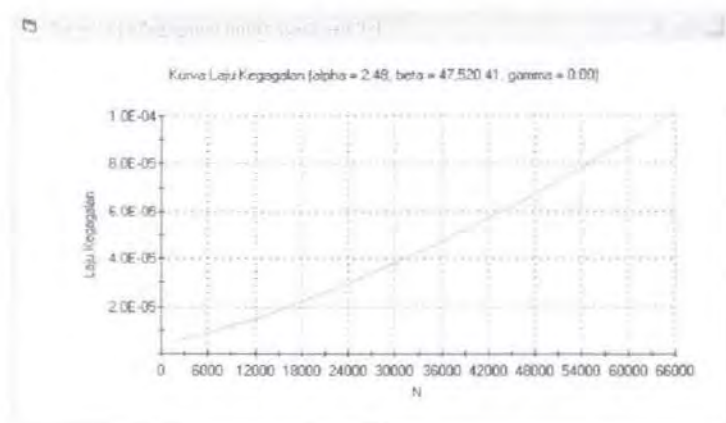


Gambar Lamp. B.11. Kurva Laju Kegagalan Spesimen 3.1



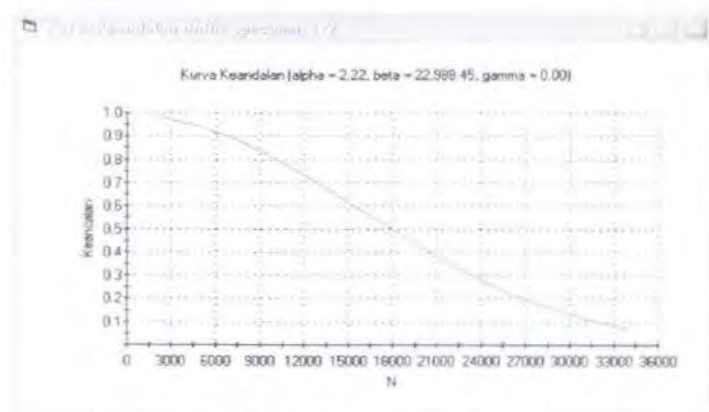


Gambar Lamp. B.12. Kurva Laju Kegagalan Spesimen 3.3

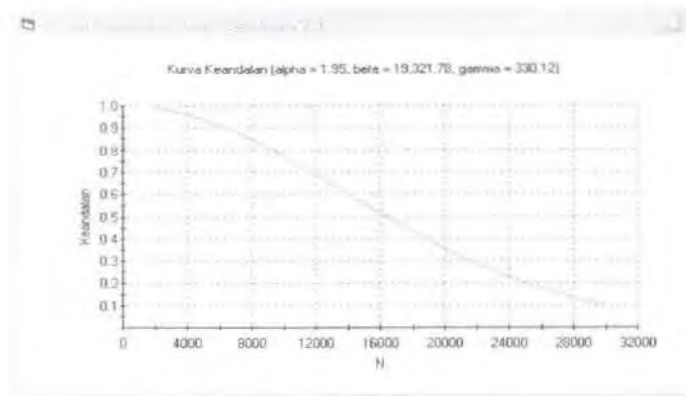


Gambar Lamp. B.13. Kurva Laju Kegagalan Spesimen 3.4

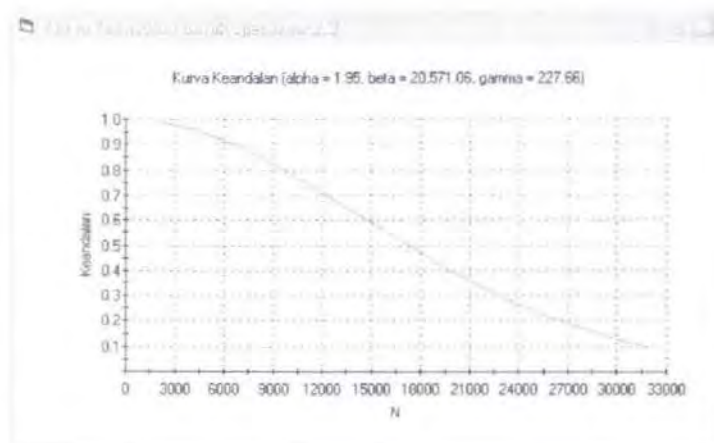
#### IV Kurva Keandalan Tiap Spesimen



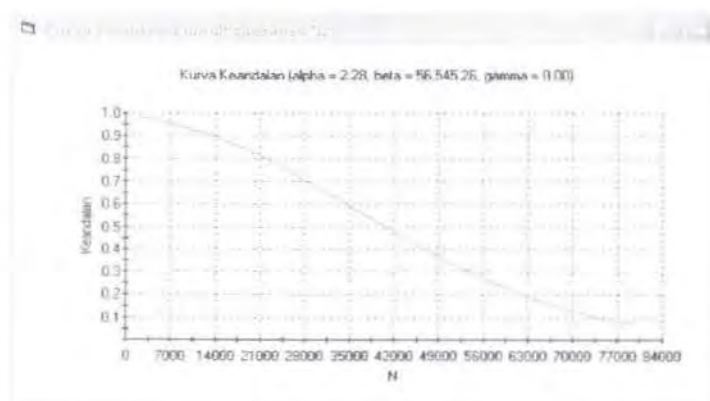
Gambar Lamp. B.14. Kurva Keandalan Spesimen 1.2



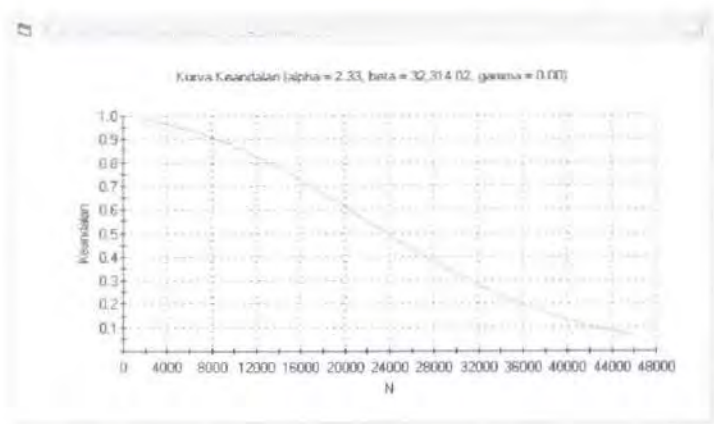
Gambar Lamp. B.15. Kurva Keandalan Spesimen 2.1



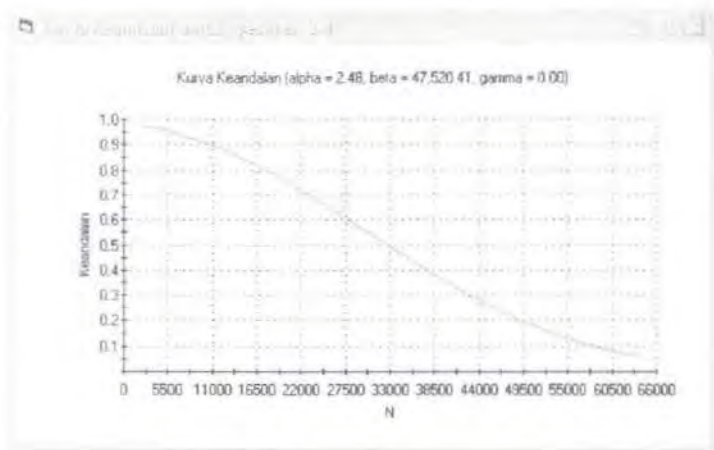
Gambar Lamp. B.16. Kurva Keandalan Spesimen 2.2



Gambar Lamp. B.17. Kurva Keandalan Spesimen 3.1



Gambar Lamp. B.18. Kurva Keandalan Spesimen 3.3



Gambar Lamp. B.19. Kurva Keandalan Spesimen 3.4



LAMPIRAN

C

nilai

fungsi

Gamma

$\Gamma(k)$



Tabel Lampiran C.1 Nilai fungsi gamma  $\Gamma(k)$  untuk  $1 \leq k \leq 2$  (Nowak & Collins, 2000)

k	$\Gamma(k)$	k	$\Gamma(k)$	k	$\Gamma(k)$	k	$\Gamma(k)$
1.00	1.00000	1.26	0.90440	1.52	0.88704	1.78	0.92623
1.01	0.99433	1.27	0.90250	1.53	0.88757	1.79	0.92877
1.02	0.98884	1.28	0.90072	1.54	0.88818	1.80	0.93138
1.03	0.98355	1.29	0.89904	1.55	0.88887	1.81	0.93408
1.04	0.97844	1.30	0.89747	1.56	0.88964	1.82	0.93695
1.05	0.97350	1.31	0.89600	1.57	0.89049	1.83	0.93969
1.06	0.96874	1.32	0.89464	1.58	0.89142	1.84	0.94261
1.07	0.96415	1.33	0.89338	1.59	0.89243	1.85	0.94561
1.08	0.95973	1.34	0.89222	1.60	0.89352	1.86	0.94869
1.09	0.95546	1.35	0.89115	1.61	0.89468	1.87	0.95184
1.10	0.95135	1.36	0.89018	1.62	0.89592	1.88	0.95507
1.11	0.94740	1.37	0.88931	1.63	0.89724	1.89	0.95838
1.12	0.94359	1.38	0.88854	1.64	0.89864	1.90	0.96177
1.13	0.93993	1.39	0.88785	1.65	0.90012	1.91	0.96523
1.14	0.93642	1.40	0.88726	1.66	0.90167	1.92	0.96877
1.15	0.93304	1.41	0.88676	1.67	0.90330	1.93	0.97240
1.16	0.92980	1.42	0.88636	1.68	0.90500	1.94	0.97610
1.17	0.92670	1.43	0.88604	1.69	0.90678	1.95	0.97988
1.18	0.92373	1.44	0.88581	1.70	0.90864	1.96	0.98374
1.19	0.92089	1.45	0.88566	1.71	0.91057	1.97	0.98768
1.20	0.91817	1.46	0.88560	1.72	0.91258	1.98	0.99171
1.21	0.91558	1.47	0.88563	1.73	0.91467	1.99	0.99581
1.22	0.91311	1.48	0.88575	1.74	0.91683	2.00	1.00000
1.23	0.91075	1.49	0.88595	1.75	0.91906		
1.24	0.90852	1.50	0.88623	1.76	0.92137		
1.25	0.90640	1.51	0.88659	1.77	0.92376		

